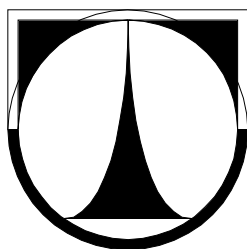


Technická univerzita v Liberci

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Liberec 2009

Petr Flodrman

Technická univerzita v Liberci

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Převodník průtoku s použitím signálového procesoru

Flow converter with DSP

Studijní program: N 2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: Mechatronika

Pracoviště: Ústav řízení systémů a spolehlivosti

Fakulta mechatroniky, informatiky

a mezioborových studií

Technická univerzita v Liberci

Studentská 2, 461 17 LIBEREC 1

Vedoucí diplomové práce: Ing. Lubomír Slavík

Konzultant: Ing. Michal Ježek

Rozsah diplomové práce

Počet stran: 79

Počet obrázků: 55

Počet tabulek: 2

Rozsah příloh diplomové práce

Počet stran: 9

Počet obrázků: 8

Počet schémat: 5

TECHNICKÁ UNIVERZITA v LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky a meziodborových studií
Ústav řízení systémů a spolehlivosti
Akademický rok: **2008/2009**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr Flodrman**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Mechatronika**

Název tématu: **Převodník průtoku s použitím signálového procesoru**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Prostudujte principy funkce a zpracování signálu z elektromagnetických senzorů průtoku a problematiku signálových procesorů.
2. Navrhněte hardware a základní měřicí software převodníku průtoku na digitální signál.
3. Realizujte funkční desku plošných spojů a ověřte základní funkci převodníku.

Rozsah grafických prací:	dle potřeby
Rozsah pracovní zprávy:	cca. 40 stran
Forma zpracování diplomové práce:	tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. **Ďaďo, S., Bejček, L., Platil, A.: Měření průtoků a výšky hladin. Praha, BEN 2005**
2. **Haasz V.: Elektrická měření, Přístroje a metody, vydavatelství ČVUT Praha 2003**
3. **Kester W. + kol.: Practical Analog Design Techniques, Analog Devices, 1995**
4. **Smékal, Z., Sysel, P.: Signálové procesory. BEN, Praha 2006**

Vedoucí diplomové práce:	Ing. Lubomír Slavík Ústav řízení systémů a spolehlivosti
Konzultant:	Ing. Michal Ježek Jablotron s.r.o.

Zadání diplomové práce:	31. října 2008
Termín odevzdání diplomové práce:	29. května 2009

V Liberci dne 31.října 2008

Anotace

Diplomová práce se zabývá vývojem převodníku napětí generovaného indukčním čidlem průtokoměru na digitální informaci, vyjadřující rychlost proudící kapaliny. V úvodu práce je rozebrána mechanika proudění kapalin potrubím a principy měření průtoku.

Zvýšená pozornost je věnována elektromagnetické metodě. Podrobně jsou popsány vlastnosti indukčního průtokoměru, hlavně příčiny vzniku parazitních rušivých signálů a možnosti jejich potlačení. Navrhovaný převodník je z důvodů dosažení vysoké přesnosti a dynamiky systému vybaven digitálním signálovým procesorem. Toto řešení umožní zpracovat měřený signál o velmi nízké amplitudě metodou koherentní detekce, jež je popsána ve vlastní kapitole.

Návrh obvodového řešení převodníku se soustředí na potlačení rušení a univerzálnost zapojení, pro maximální ovladatelnost softwarem. Převodník umožňuje měnit tvar budicích signálů a měřit proud budicími cívkami. Schopnost převodníku určit tvar budicího signálu spolu s možností aktualizace softwaru umožňuje měnit parametry měření. Dalším řešeným úkolem je schopnost převodníku detekovat přítomnost média v potrubí a přítomnost bublin v potrubí.

Výsledkem práce jsou osazené a oživené desky plošných spojů připravené pro aplikování řídicího software. Výkonný procesor umožní řešení celé úlohy v programu LabView, což přináší vysokou variabilitu při získávání užitečného signálu v zaručeném prostředí.

V závěrečné části práce jsou shrnuty dosažené výsledky měření na analogové části ověřené na kalibrační lince firmy EESA.

Klíčová slova:

Měření průtoku kapalin, indukční průtokoměr, detekce zaplněného potrubí

Annotation

The main aim of the diploma thesis is development of converter of voltage from electro-magnetic flowmeter, which is proportional to the liquid flow velocity. There is described mechanics of liquid flow and principal of measuring of flow in the beginning.

Electromagnetic method is described more accurate including influence of parasitic signals and possibilities of their removal. Designed converter is assembled by digital signal processor for reaching high accuracy and high dynamic range. This solution provides processing of low level signal with method of coherent detection, which is described in special part.

Design of circuit solution of the converter is pointed out to suppression of parasitic signal and versatility of circuitry for maximal controllability of software. Converter provides to change shape of coil driving signal and to measure current going through the coils. Ability of setting of driving signal with possibility of software upgrading provides to quickly change parameters of measurement. The other solved problem is ability of detection of empty pipes and presence of air bubbles.

Assembled and launched PC boards are concrete result of this thesis. PC boards are ready for implementation of software. Powerful processor provides solution of the whole task in software LabView, which brings high variability by obtaining useful signal from noise interferenced signal.

The final test of this converter was done on calibration stand in EESA company and all results of measurement on analog section of the converter are described at the last part of this thesis.

Key words:

Liquid flow measurement, electro-magnetic flowmeter, detection of empty pipes

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V Liberci 27. 5. 2009

.....

Petr Flodrman

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Lubomíru Slavíkovi, za veškerou poskytnutou pomoc, která byla velmi přínosná nejen při samotné realizaci a následném měření na zařízení. Firmě EESA za umožnění měření na jejím technickém vybavení. Firmě Cube za velmi vstřícné jednání při výrobě desek plošných spojů. Svým rodičům za neocenitelnou podporu po celou dobu studia a v neposlední řadě všem nejmenovaným, kteří mi pomohli s touto diplomovou prací.

Obsah

Seznam použitých symbolů	11
Úvod.....	12
1 Měření průtoku.....	14
1.1 Základní vlastnosti kapalin	14
1.1.1 Viskozita.....	16
1.1.2 Druhy proudění	17
1.1.3 Mezní vrstva	18
1.1.4 Rovnice kontinuity.....	19
1.1.5 Kavitace.....	20
1.1.6 Hagen-Poiseuilův zákon.....	20
1.2 Rozdělení průtokoměrů	21
1.3 Indukční průtokoměry	22
1.3.1 Princip funkce indukčního průtokoměru.....	23
1.3.2 Ostatní vlivy	26
2 Zpracování signálů z indukčních průtokoměrů.....	27
2.1 Příčiny rušení signálů	27
2.2 Základní vlastnosti synchronní detekce.....	29
2.3 Potlačení rušení volbou průběhu magnetického pole.....	35
2.3.1 Lichoběžníkový průběh magnetického pole.....	36
2.3.2 Magnetické pole o dvou frekvencích	37
2.4 Zpracování signálu signálovým procesorem	39
3 Návrh obvodového a HW řešení.....	40
3.1 Rozbor požadavků.....	40
3.2 Vstupní zesilovač a detekce zaplnění.....	41
3.3 Buzení.....	49
3.4 Řízení zpracování signálu	52
3.5 Návrh DPS	57
4 Návrh SW řešení	59
4.1 Zpracování užitečného signálu.....	59
4.2 Řízení detekce média.....	61
5 Měření na převodníku.....	64
5.1 Měřicí soustava	64

5.2 Detekce zaplnění potrubí	64
5.3 Přesnost měření rychlosti průtoku.....	68
5.4 Zhodnocení dosažených výsledků.....	70
Závěr.....	71
Literatura.....	72
Seznam příloh diplomové práce.....	73

Seznam použitých symbolů

A	[-,cm ²]	amplituda, plocha elektrod
Au	[dB]	zesílení
B	[T]	magnetická indukce
D	[cm]	světlost, průměr potrubí
E	[V·m ⁻¹]	intenzita elektrického pole
F	[N]	síla
f	[Hz]	frekvence
G	[S]	vodivost
l	[m]	délka
m	[kg]	hmotnost
p	[Pa]	tlak
Q	[l·s ⁻¹]	průtok
q	[l·s ⁻¹]	okamžitý průtok
Q _m	[kg·s ⁻¹]	hmotnostní průtok
q _m	[kg·s ⁻¹]	okamžitý hmotnostní průtok
Q _v	[m ³ ·s ⁻¹]	objemový průtok
q _v	[m ³ ·s ⁻¹]	okamžitý objemový průtok
R	[Ω]	elektrický odpor
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
S	[m ²]	plocha
U	[V,m·s ⁻¹]	elektrické napětí, střední průřezová rychlost
V	[m ³]	objem
v	[m·s ⁻¹]	rychlost
Θ	[rad]	velikost fázového úhlu
Φ	[Wb]	magnetický indukční tok
η	[Pa·s]	dynamická viskozita tekutiny
ν	[m ² ·s ⁻¹]	kinematická viskozita tekutiny
ρ	[kg·m ⁻³]	hustota
τ	[-]	činitel tlumení
ω	[rad·s ⁻¹]	úhlová rychlost

Úvod

Cílem této diplomové práce je vyvinout převodník velmi malých nestacionárních napětí, získaných z indukčního průtokoměru, na digitální informaci o rychlosti proudící kapaliny v potrubí. Naměřený signál bude digitálně zpracován v signálovém procesoru, dle požadavků zadávající firmy EESA. Máme tedy řešit klasické parazitní jevy, vznikající na vstupní části indukčních průtokoměrů, pomocí moderních přístupů k návrhu elektronických zařízení. Jako doplňková vlastnost je dána možnost detekce přítomnosti média v potrubí, bez dodatečných měřicích snímačů, snadno zastavitelná do stávajících konstrukcí.

V práci jsou nejprve popsány základní vlastnosti a principy měření průtoku. Zvláštní pozornost je věnována indukčnímu průtokoměru, od samotných fyzikálních základů principu a funkce. Na rozbor vzniku rušení navazuje problematika obtíží při zpracování signálů z indukčních průtokoměrů. Dále jsou popsány metody digitálního zpracování signálů v signálových procesorech. Z těchto metod zpracování signálů je blížeji popsána synchronní detekce, což je výhodná metoda pro získání užitečné informace z velmi zarušeného signálu. Takto zpracované signály jsou ještě podrobeny postprocesingu, tedy dodatečnému zpracování dat, které nadále zlepši hodnotu výsledků. Postprocessing dokáže také částečně potlačit různé poruchy a nelinearity.

V praktické části práce jsou teoretické znalosti uplatněny při samotném návrhu fyzického převodníku, i při návrhu základního měřicího softwaru. Převodník byl testován nejprve v laboratorních podmínkách na umělém modelu snímače průtoku. Po odladění byl testován přímo na kalibrační lince průtokoměrů firmy EESA, kde lze objektivně posoudit chování za reálných podmínek a porovnat s laboratorními měřeními s dostatečnou přesností.

Práce má svůj význam jak v oblasti návrhu měřicího hardwaru, tak i softwaru zpracovávajícího signál. V současné době již existuje několik publikací zabývajících se přímo průtokoměry [1-3], jejich principem funkce, vhodností pro jednotlivá konkrétní použití a jistými typickými vlastnostmi svázanými s jejich použitím. Obdobná situace nastává i u signálových procesorů a analýzou signálů [2-3]. Literatura se těmito tématům věnuje, avšak většinou na teoretické úrovni. Domácí literatura, která by se zabývala hlubším průnikem teoretického a praktického využití, momentálně není dostupná. Zpracováním signálů z reálných systémů a jejich vyhodnocováním, se věnuje literatura

pouze zahraniční. Přičemž signály z takto typických senzorů, jako je indukční snímač průtoku, vyžadují specifický přístup pro jejich zpracování, ve formě zvláště přizpůsobených algoritmů vázaných na konkrétní aplikaci. Možným důvodem je, že si tyto znalosti většina firem velmi dobře chrání jako své know how, stejně jako pokročilejší principy detekce média v potrubí.

1 Měření průtoku

Měření průtoku je jednou z nejstarších a nejčastějších průmyslových aplikací, spolu s měřením teploty a tlaku. Při jejich měření se však setkáme s typickými pojmy a charakteristikami, jejich základy jsou objasněny v následujících kapitolách.

1.1 Základní vlastnosti kapalin

Tekutina je látka v kapalném skupenství bez vlastního tvaru, kapaliny kopírují tvar nádoby v níž je držena. Kinetická energie částic kapaliny je malá ve srovnání s vazební potenciální energií, takže se částice vzájemně udržují v určitých rovnovážných polohách, kolem kterých vykonávají kmitavý pohyb. Tyto rovnovážné polohy se u kapalin mohou přemísťovat, dochází tedy k přemísťování částic v celém objemu látky. Vazba mezi částicemi zajišťuje, že se za běžných podmínek objem látky nemění [1-1]. Jako tekutiny se chovají za určitých podmínek také páry a plyny.

Rychlost, je vektor elementu kapaliny, jehož směr je totožný se směrnici pohybu. Tedy je jeho velikost dána jako poměr změny dráhy ku změně času, tj.

$$\vec{v} = \frac{\Delta l}{\Delta t}. \quad 1.1$$

Jiné vyjádření rychlosti, „*Střední průřezová rychlost*“ označovaná U , je průměrná rychlost skrze protékanou plochu, odvodit lze za pomoci objemového průtoku jako

$$U = \frac{q_v}{S}. \quad 1.2$$

Průtok je podíl množství tekutiny protékající průtočným průřezem potrubí a času potřebného k protečení daného množství tímto průřezem [1-2].

*Střední průtok*¹, je střední hodnota průtoku v časovém intervalu.

Objemové množství, udává prostorovou velikost, kterou tekutina zaujímá.

¹ v dalších částech práce, je označován střední průtok v čase i průřezu také jako v z důvodu, že U je použito jako symbol elektrického napětí.

Objemový průtok q_v , je průtok, u něhož je množství proteklé tekutiny vyjádřeno jejím objemem [1-2].

Obdobně jej lze definovat jako objem tekutiny protečený plochou za čas

$$Q_v = \frac{\Delta V}{\Delta t} . \quad 1.3$$

Tato hodnota však neukazuje na velikost v přesném čase, proto je definován „*Okamžitý objemový průtok*“, který přesně vystihuje tuto potřebu. Definován podle [1-2], jako

$$q_v = \frac{dV}{dt} . \quad 1.4$$

Pokud známe plochu průtočného průřezu a střední rychlost proudění, můžeme využít vztahu

$$q_v = Sv \quad 1.5$$

a protečený objem je tedy

$$V = \int_{t_1}^{t_2} q_v dt . \quad 1.6$$

Hmotnostní průtok, je tedy průtok, který je definován jako hmotnost kapaliny protečené průtočnou plochou za určitý čas

$$Q_m = \frac{\Delta m}{\Delta t} . \quad 1.7$$

Obdobně jako u okamžitého objemového průtoku definujeme „*Okamžitý hmotnostní průtok*.“

$$q_m = \frac{dm}{dt} . \quad 1.8$$

Za využití vztahu 1.4 lze *okamžitý hmotnostní průtok* napsat po úpravě jako

$$q_m = \rho q_v . \quad 1.9$$

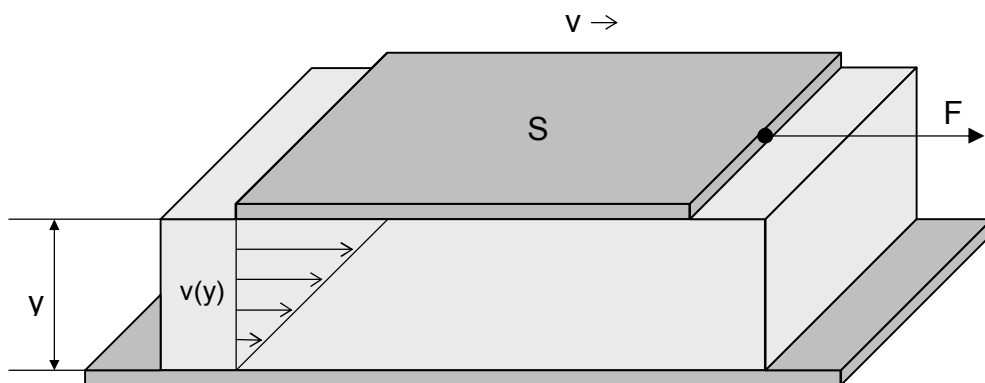
Pro hmotnost proteklé kapaliny obdobně platí

$$m = \int_{t_1}^{t_2} q_m dt . \quad 1.10$$

Rychlostní profil udává velikost rychlosti proudění v bodě napříč průřezem.

1.1.1 Viskozita

Viskozita, je fyzikální veličina udávající poměr mezi tečným napětím a změnou rychlosti v závislosti na vzdálenosti mezi sousedními vrstvami při proudění skutečné kapaliny [1-1]. Názorný popis viz obr. 1.1. Smykové napětí mezi vrstvami je způsobeno působením vazebních sil mezi molekulami, proto dochází při pohybu k vnitřním ztrátám způsobeným vnitřním třením.



Obr. 1.1 Odvození viskozity

Nahradíme-li dvě vrstvy pevnými deskami, mezi kterými je kapalina, jednou pevnou a druhou pohyblivou o ploše S . Pak můžeme vyjádřit smykové napětí jako poměr mezi silou F působící ve směru rychlosti a plochou smýkané desky, tedy

$$\frac{F}{S} = \tau = \eta \frac{dv}{dy}. \quad 1.11$$

Velikost smykového napětí je tedy rovna gradientu rychlosti podél průřezu kapaliny. Velikost rychlosti v kapalině se tedy s polohou v ose y mění, od téměř nulové u pevné desky, až po téměř rovnou v , u desky pohyblivé. Konstanta úměrnosti η , je také nazývána *dynamickou* nebo *absolutní viskozitou*.

Kinetická viskozita je definována také za pomoci hustoty kapaliny

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}. \quad 1.12$$

Viskozita má vysoký vliv na rychlostní profil proudění kapaliny uzavřeným potrubím, srovnatelný s rychlostí.

Pro popis viskozity plynů se používá *Sutherlandův vzorec*, jím se nebudeme zabývat, je mimo oblast našeho zájmu.

1.1.2 Druhy proudění

Proudění rozdělujeme na dva druhy:

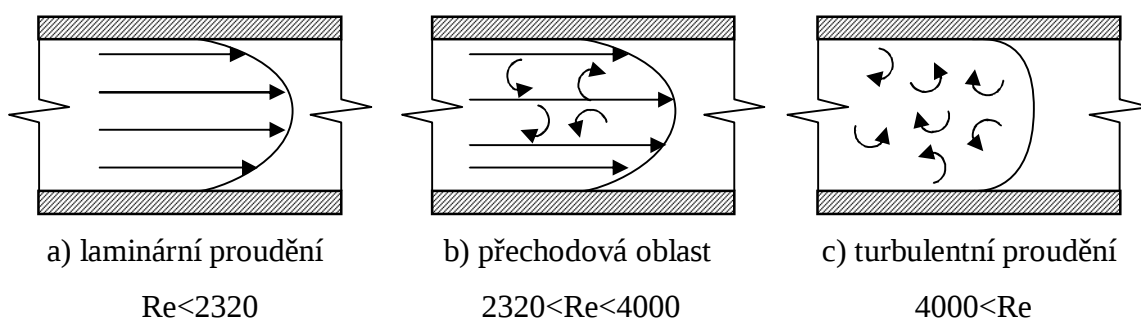
- laminární proudění
- turbulentní proudění

Na druh proudění má nejvyšší vliv rozložení sil v kapalině, třecích a setrvačných.

Laminární proudění, částice se pohybují po paralelních drahách, které se nekříží. Převládá působení sil třecích, ty se uplatňují mezi jednotlivými nemíchajícími se vrstvami. V příčném řezu je rychlostní rozložení ve tvaru paraboly, viz. obr. 1.1a. Nejvyšší rychlost je tedy uprostřed a nejmenší u stěn potrubí, kde jsou účinky tření nejvyšší. Pro potrubí s kruhovým průřezem má pak rychlostní profil tvar symetrického paraboloidu, také zvaný jako úplně vyvinutý rychlostní profil. Laminární proudění je typické pro viskózní kapaliny a malé rychlosti [1-3].

Turbulentní proudění vzniká v okamžiku, kdy se začnou jednotlivé proudící vrstvy navzájem křížit a míchat. Vznikají víry a další náhodné pohyby, které nepřispívají k výslednému pohybu, pouze zvyšují energetickou náročnost nutnou pro udržení konstantního průtoku. K dalšímu zvýšení průtoku je nutné podstatně zvýšit tlak. Uplatňují se především síly setrvačné. Kapalina proudí v celém průřezu téměř stejnou rychlostí, viz. obr. 1.2b, jedná se o takzvaný plochý rychlostní profil. K turbulentnímu proudění může docházet při mísení dvou různých toků nebo v blízkém okolí překážky, například clony [1-3].

Kolísání tlaku při turbulentním proudění, nazývané *fluktuace*, má za následek vyzařování akustické energie a podílí se na ztrátách při turbulentním proudění.



Obr. 1.2 Rychlostní profily pro laminární a turbulentní proudění

Kritériem pro posouzení druhu protékání je takzvané *Reynoldsovo číslo*. To udává vztah mezi setrvačnými a dynamickými silami působícími v tekoucí kapalině. Pro proudění trubicí o kruhovém průřezu je dáno vztahem

$$Re = \frac{\rho v^2 D}{\eta v} . \quad 1.13$$

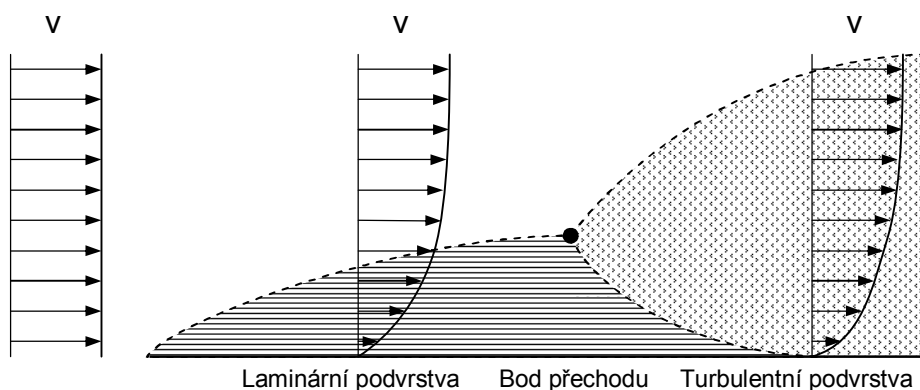
Úpravou předchozího vztahu využitím vztahu 1.12, jej můžeme zjednodušit do tvaru

$$Re = \frac{vD}{\nu} . \quad 1.14$$

Pro potrubí s kruhovým průřezem platí kritická hranice mezi laminárním a turbulentním prouděním o velikosti $Re < 2320$, platí pro laminární proudění. Nazýváme ji *mezní rychlost*. V praxi se v jejím okolí vyskytuje malá přechodová oblast s nerovnoměrným rychlostním profilem obr. 1.2b, kde nelze jednoznačně rozhodnout o druhu proudění. Přechod z laminárního proudění do turbulentního se neděje postupně, ale spíše se mění skokem při vhodných podmínkách [1-4].

1.1.3 Mezní vrstva

Mezní vrstvou nazýváme tenkou vrstvu kapaliny přiléhající k povrchu tělesa, které kapalina obtéká. Na vlastnosti mezní vrstvy má významný vliv velikost viskozity kapaliny. Mezní vrstva je specifická velkou změnou rychlosti od nulové, na povrchu obtékaného tělesa, po hodnotu ustáleného toku.



Obr. 1.3 Vznik mezní vrstvy na povrchu potrubí

Mezní vrstva má značný vliv na funkci mnoha druhů průtokoměrů, jelikož u většiny měřicích principů jsou důležité měřicí části umístěny buď přímo na stěnách potrubí (elektrody indukčního průtokoměru), nebo v jejich bezprostřední blízkosti (turbínové průtokoměry, jejich lopatky).

Na obr. 1.3 je znázorněn průběh mezní vrstvy u náběžné hrany tělesa. Tloušťka mezní vrstvy je nejprve nulová, postupně se uplatňují třecí síly a tloušťka mezní vrstvy roste až k bodu přechodu. Od bodu přechodu se mezní vrstva začíná dělit, tloušťka laminární mezní vrstvy klesá a nad ní se utváří druhá turbulentní vrstva, její tloušťka prudce stoupá. Maximální tloušťku mezní vrstvy ovlivňuje především drsnost povrchu tělesa a úroveň turbulencí v kapalině. Za určitých podmínek (především zakřivení obtékané plochy) může dojít až k odtržení proudu od povrchu [1-5].

1.1.4 Rovnice kontinuity

Uvažujeme-li kapalinu s konstantní hustotou, tedy kapalinu nestlačitelnou, a nedochází-li v uzavřeném potrubí k hromadění nebo rozpouštění kapaliny, musí platit rovnost hmotnosti kapaliny vtečené a vytečené, tedy

$$\rho V_1 = \rho V_2. \quad 1.15$$

Pro proudící kapalinu průřezem S , pak platí

$$\rho S_1 v_1 = \rho S_2 v_2. \quad 1.16$$

Jelikož uvažujeme kapalinu nestlačitelnou, můžeme vyloučit ρ , a rovnici zjednodušit na

$$S_1 v_1 = S_2 v_2 = \dots = S_n v_n = \text{const.} \quad 1.17$$

Označujeme jako *rovnici kontinuity*.

Rovnice kontinuity se v souvislosti s měřením průtoků používá k uzpůsobení parametrů proudící kapaliny. Především ke změně rychlosti proudění kapaliny a to jak k zvýšení také i pro snížení. Pokud je rychlost zvyšována, je nutno zmenšit světlost potrubí, tím se zvyšuje rychlost proudící kapaliny, ale narůstá tlakový spád na průtokoměru, avšak umožní měřit i nižší průtoky než na jaké je průtokoměr navrhnut.

1.1.5 Kavitace

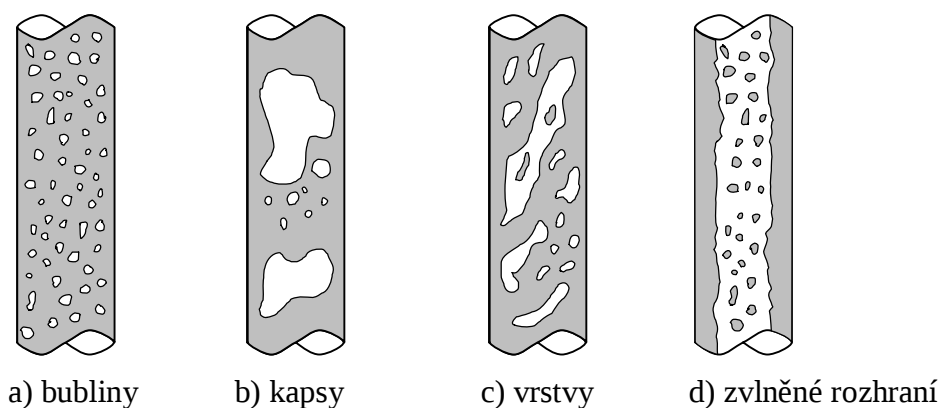
Kavitace, je vznik plyných dutin uvnitř prostředí kapalné fáze. Příčinou vzniku je náhlý pokles tlaku v proudící kapalině. Může být doprovázena lokálním vznikem kavitačních bublin, tedy malých dutinek vyplněných plynem nebo párou [1-1].

Kavitaci lze předejít udržením dostatečného tlaku v kapalině, jeho velikost je dána empirickým vztahem

$$p_k = 2\Delta p_{\max} + 1,25 p_v. \quad 1.18$$

U průtokoměrů dochází ke vzniku kavitací především u kapalin s vysokým obsahem plynů při prudkém poklesu tlaku, většinou při změně světlosti potrubí. Vzniklé kavitace se projevují jako ohřev, vibrace, vznik elektrického proudu, silný hluk. Dochází také k narušování povrchu obtékaných částí v místech, kde kavitace zanikají, vlivem tlakových rázů [1-3].

Druhy promísení plyné a kapalné fáze tekutiny jsou popsány na obrázku 1.4.



Obr. 1.4 Kapalina s různým obsahem plyné fáze tekutiny

1.1.6 Hagen-Poiseuilův zákon

Hagen-Poiseuilův zákon nám říká, že objemový tok viskózní tekutiny při laminárním proudění trubicí kruhového průřezu je přímo úměrný tlakovému spádu $\frac{\Delta p}{\Delta l}$ a čtvrté mocnině poloměru trubice. Je tedy nepřímo úměrný dynamické viskozitě η .

Pro kruhový průřez potrubí platí

$$q_v = \frac{\pi D^4}{128\eta} \frac{\Delta p}{\Delta l} \quad 1.19$$

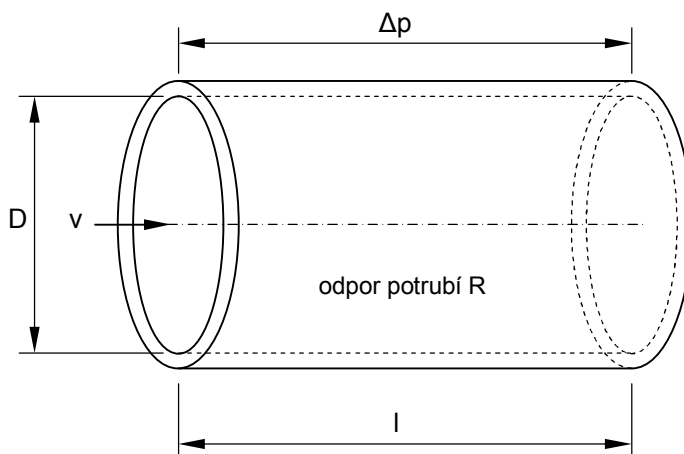
Hagen-Poiseuillův zákon platí pro Newtonovské kapaliny s minimální turbulencí [1-3].

S využitím tohoto zákona můžeme též definovat objemový průtok jako podíl tlakového rozdílu a viskózního odporu, tedy

$$q_v = \frac{\Delta p}{R_v} \quad 1.20$$

Viskózní odpor pro kruhové potrubí o světlosti D je roven

$$R_v = \frac{128\mu l}{\pi D^4} \quad 1.21$$



Obr. 1.5 Odpor potrubí, geometrie potrubí

1.2 Rozdělení průtokoměrů

Obecně dochází při jakémkoliv měření k transformaci jedné fyzikální veličiny na jinou. U průtokoměrů je to tedy vztah mezi rychlostí proudění, případně kinetickou energií a výstupní veličinou nesoucí informaci.

Měření průtoku stejně jako jiná měření mohou být přímá a nepřímá. Přímé měření je prováděno dávkovacím průtokoměrem, kde dochází k dělení průtoku na přesně definované části. U většiny průtokoměrů se jedná o nepřímé měření. A to buď v závislosti na rychlosti proudící kapaliny, nebo na její kinetické energii.

Dělení průtokoměrů:

- rychlostní:
 - průřezové
 - turbínové
 - plovákové
 - fluidové
 - ultrazvukové
 - indukční
 - Coriolisovy
 - tepelné
 - značkové
- kineticko-energetické:
 - deformační
 - objemové
 - gyroskopické

Obdobně lze dělit průtokoměry podle měřeného průtoku na objemové nebo hmotnostní.

Měření průtoku v nezaplněných potrubích nebo otevřených kanálech, vyžaduje zvláštní přístup, který musí počítat s měnícím se velikostí průřezu kapaliny.

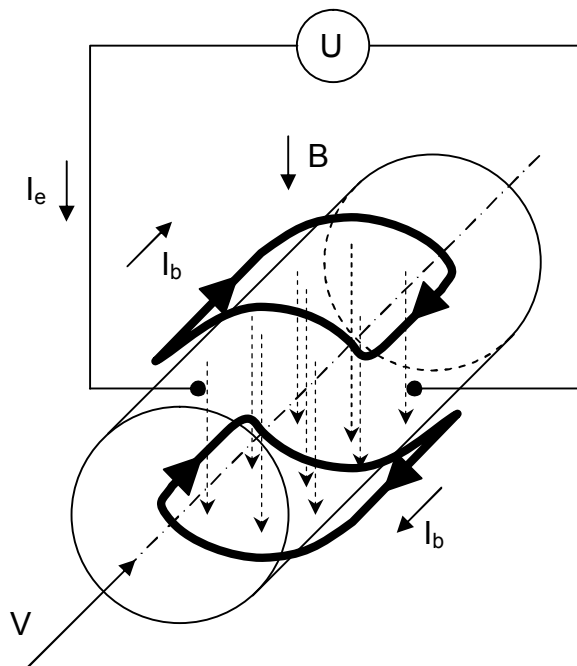
1.3 Indukční průtokoměry

Podstatou činnosti této skupiny průtokoměrů je pohyb elektricky vodivé látky skrze magnetické pole.

Terminologie v označování průtokoměrů na tomto principu je poněkud nejednotná, setkáme se s označeními, magnetický, indukční, či elektromagnetický průtokoměr. Nejpřesněji popisujícím názvem je elektromagnetický, avšak normalizovaný český název je indukční průtokoměr. Ještě se vyskytuje průtokoměr pracující na obráceném principu zvaný magnetoelektrický průtokoměr. Jelikož není v oblasti našeho zájmu, nebudeme se jím zabývat.

1.3.1 Princip funkce indukčního průtokoměru

Na obr. 1.6 je znázorněno schéma indukčního průtokoměru. Směr proudící kapaliny, orientace magnetického pole a směr snímaného proudu jsou na sebe navzájem kolmé.



Obr. 1.6 Princip indukčního průtokoměru

Vznik napětí na elektrodách lze vysvětlit Faradayovým zákonem, nebo také působením Lorentzovy síly. *Lorentzova síla* vzniká v důsledku působením Lorentzova zákona

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}). \quad 1.22$$

Popisuje silové působení na náboj pohybující se napříč magnetickým polem. Magnetickým polem vyvolaná Lorentzova síla, mění pouze směr náboje a nemá vliv na jeho rychlost. Velikost této síly vyjadřuje vztah

$$\vec{F}_m = q(\vec{v} \times \vec{B}). \quad 1.23$$

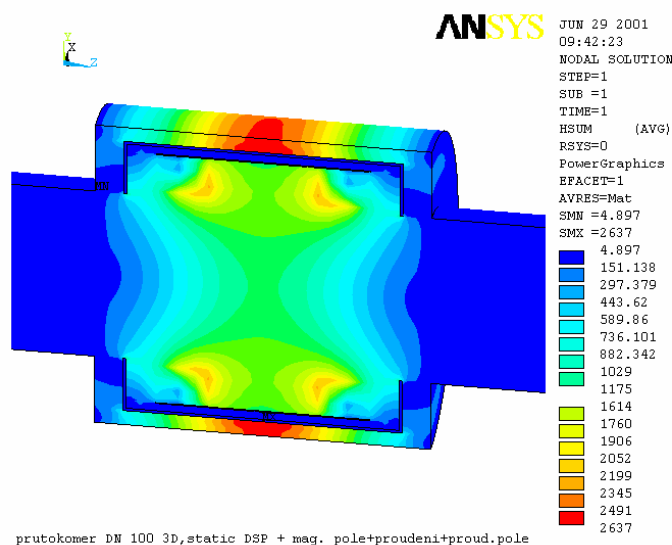
Vychýlené náboje se střetávají s elektrodami průtokoměru a způsobují tak vznik elektrického potenciálu mezi měřicími elektrodami.

Budeme-li uvažovat homogenní elektrické pole, pak je jeho intenzita dána

$$|\vec{E}| = \frac{U}{D}. \quad 1.24$$

Tedy vzdáleností a napětím na elektrodách. Ve skutečnosti však elektrické pole v samotném průtokoměru není homogenní a jeho tvar lze určit jen velmi obtížně.

Při výpočtu intenzity magnetického pole v prostoru jsme odkázáni na simulaci pomocí metody konečných prvků.

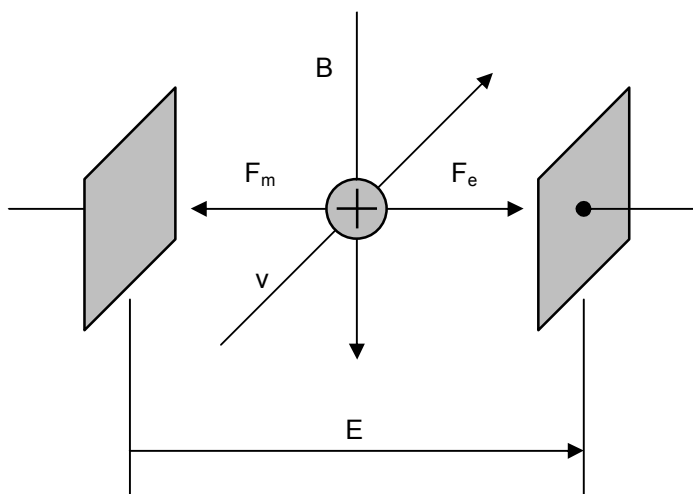


Obr. 1.7 Rozložení magnetického pole uvnitř průtokoměru [1-6]

Lorenzův zákon nám též popisuje sílu působící na náboj v opačném směru než síla magnetická

$$\vec{F}_e = q\vec{E}. \quad 1.25$$

Rovnovážný stav nastane při rovnováze sil, za předpokladu homogenity obou polí, magnetického i elektrického. Orientace sil dle je znázorněna na obrázku 1.8.



Obr. 1.8 Orientace veličin

Pokud dodržíme podmínky kolmosti orientace veličin a homogenosti polí, dostaneme z rovnic 1.23, 1.24, 1.25 stejný zápis jako *Faradayův zákon*, tedy

$$U = v \cdot B \cdot D . \quad 1.26$$

Pokud však rychlostní profil není rovný, tak tento vztah vzniklou situaci dostatečně nepopisuje.

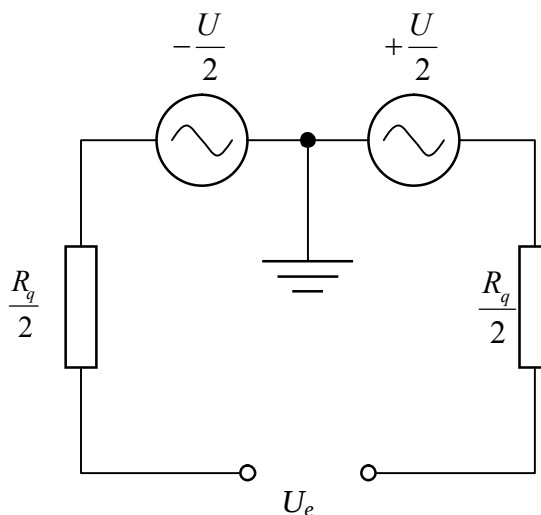
Spojenci mezi elektrodami průtokoměru lze rozdělit na konečný počet n dílčích úseků D_i , z nichž každý přispívá svým dílčím napětím U k celkovému napětí mezi elektrodami U_e [1-7]. Výsledné napětí lze zapsat jako

$$U_e = \sum_{i=1}^n u_i = \sum_{i=1}^n B_i \Delta l_i v_i . \quad 1.27$$

Nebo v integrální podobě

$$U_e = \int_{E_1}^{E_2} u(l) dl = \int_{E_1}^{E_2} B(l) v(l) dl . \quad 1.28$$

Z předpisu vyplývá, že napětí na elektrodách je nezávislé na tvaru rychlostního profilu, ale jen na jeho střední hodnotě. Pouze však za podmínky homogenosti magnetického pole. Předpokládáme-li rovnoměrné rozložení potenciálu uvnitř kolmého průřezu potrubím a spojení kapaliny se zemí (toto spojení je záměrné z důvodu omezení rušení), můžeme pak určit náhradní elektrický obvod [1-8],



Obr. 1.9 Náhradní elektrický obvod

Napětí vznikající v kapalině je vztaženo ke společnému uzlu, což bývá zemnění, kolem kterého je za ideálních podmínek symetrické.

Výpočet vnitřního odporu kapaliny R_q je poměrně složitý, jelikož se musí počítat odpor spojitého prostředí. Možností je využít výpočtu pomocí metody konečných prvků, nebo pokud potřebujeme alespoň přibližnou hodnotu, můžeme použít vztah

$$R_q \approx \frac{1}{\sigma} \frac{D}{A}. \quad 1.29$$

Pro bodové elektrody existuje vztah zvaný *Faustova formule* [1-9]

$$R_q \approx \frac{1}{\sigma D}, \quad 1.30$$

který přibližně určí velikost odporu mezi elektrodami.

1.3.2 Ostatní vlivy

Jak bylo popsáno v kapitole 1.3.1., má na měření indukčním průtokoměrem značný vliv vodivost protékané kapaliny. Běžné indukční průtokoměry standardně pracují do vodivosti kapaliny $5 \mu S \cdot cm^{-1}$ [1-10], v porovnání s běžnou pitnou vodou, jejíž vodivost je $200 - 300 \mu S \cdot cm^{-1}$. Pod touto hranicí již nepracují korektně nebo vůbec, nelze tedy jimi měřit kapaliny jako oleje, benzín, ale i neionizovanou vodu apod. Naopak dobře vodivé kapaliny, i tekuté kovy jako rtuť s vodivostí $10^{10} \mu S \cdot cm^{-1}$, lze měřit velmi dobře. Chemicky agresivní kapaliny jako žíraviny a podobné měřit lze pouze za podmínky, že negativně nepůsobí na měřicí člen.

Měřená látka by měla být co nejvíce homogenní, proto se u směsí látek které se dobře neslučují instalují takzvaná míchadla a směs se dodatečně homogenizuje [1-11].

Z kapitoly 1.3.1. je taktéž patrný požadavek na homogenost magnetického pole, tento požadavek je v praxi nedosažitelný. Nehomogenost magnetického pole způsobí, že měřená hodnota není rovna střední rychlosti proudící kapaliny, ale je funkcí rychlostního profilu a intenzity magnetického pole. Deformace magnetického pole může být způsobena i samotnou kapalinou obsahuje-li magneticky vodivé částice. Záleží však na jejich konkrétních vlastnostech, běžně se však indukční průtokoměr používá pro měření diamagnetických nebo paramagnetických kapalin [1-9]. Proud vyvolaný v kapalině elektrickým polem mezi elektrodami, se taktéž superponuje na budící magnetické pole.

2 Zpracování signálů z indukčních průtokoměrů

Zpracování signálů z indukčních průtokoměrů je specifická záležitost, která vyžaduje vlastní přístup. Proto je nejprve objasněn vznik rušení a následně metody jeho potlačení.

2.1 Příčiny rušení signálů

Kapsy plynů, nebo bublin v kapalině, se při měření projeví jako prudký nárůst průtoku. Pokud jich kapalina obsahuje málo, typicky do 5 %, lze jejich vliv částečně eliminovat instalací míchadla nebo horizontální montáží potrubí [1-3]. Pokud jsou již bubliny či kapsy větší než plocha elektrod, způsobené chyby měření již není možno jednoduše eliminovat. Projevují se jako prudké skoky průtoku.

Obdobné projevy, prudký nárůst průtoku, mohou způsobovat i usazeniny na měřicích elektrodách, jedná-li se o nevodivé usazeniny. Usazeniny mohou být také vodivého charakteru a v případě vodivé měřicí trubice mohou způsobit zkrat mezi elektrodami. Oba druhy usazenin však způsobí zmenšení světlosti potrubí, což také negativně ovlivní přesnost měření. Zabránit usazování usazenin je možné konstrukcí, a to buď co nejhladším povrchem, kde se usazeniny nemohou zachytit, nebo konstrukcí elektrod, kde v jejich okolí vznikají takové turbulence, které elektrody čistí. Krajním řešením je mechanická vyměnitelnost elektrod, nebo přímo mechanický očišťovací systém. Kromě mechanického čištění existuje i elektrochemická metoda, přivedením vyššího napětí na elektrody. Elektrochemickou metodou lze čistit pouze tenké vrstvy usazenin [1-3].

Elektrochemické pochody, probíhající na povrchu elektrod způsobují vznik malého a pomalu se měnícího stejnosměrného napětí. Z principu se tomuto jevu nemůžeme vyhnout, jen ho minimalizovat volbou vhodného materiálu povrchu měřicích elektrod. Dalším vhodným způsobem potlačení tohoto negativního vlivu, a jiných dalších, je zapojení vstupního rozdílového zesilovače s vysokou hodnotou CMMR, tedy potlačením souhlasných napětí, které jsou pouze rušivého charakteru a nenesou žádnou informaci.

Rušení vzniklé střídavým magnetickým polem, je způsobeno především budicími cívkami samotného měřicího čidla. Mají tedy stejnou frekvenci jako budicí pole, a proto se označují jako *synchronní*. Injektovat rušení mohou dvěma různými způsoby, transformací nebo vířivými proudy. Rozptylové pole, které kolem sebe mají budicí cívky, se transformuje přímo do přívodů měřicích elektrod prostřednictvím indukční vazby. Potlačit tento jev lze vhodnou orientací přívodů. Jelikož však není magnetické pole homogenní, nelze dosáhnout úplného potlačení. Pro maximální potlačení se používají dodatečné cívky, opačně orientované vzhledem k magnetickému poli, které v oblasti měřicích přívodů ruší rozptylové magnetické pole [1-3]. Druhou složkou synchronního rušení je rušení vířivými proudy. V kapalině jsou vířivé proudy vyvolány prudkým nárůstem magnetického toku. Dle Faradayova zákona vzniká ve vodivé kapalině proud a jemu odpovídající napětí na elektrodách. Oba druhy rušení jsou úměrné dB/dt , tedy jsou fázově posunuté o $\pi/2$ oproti užitečné složce, vyvolané magnetickým polem.

Existuje také *asynchronní rušení*, tedy rušení na jiných než pracovních frekvencích průtokoměru. Obvykle nejsilnější složka bývá průnik napětí o síťovém kmitočtu, do vstupní části měřicích obvodů, které se vyznačují velkou vstupní impedancí a zesílením. Zabránit průniku asynchronního rušení je poměrně obtížné, nejčastěji se využívá filtrační schopnost vstupních obvodů, budicí kmitočet rozdílný od síťového a jeho násobků [1-3]. Duhou metodou je naopak volit budicí kmitočet jako celočíselný násobek periody síťového kmitočtu a svázaný s fází sítě, tedy i fází rušení. Při zpracování signálu synchronní detekcí se pak celé násobky periody sítě vyruší.

Průnik rušení do obvodu může vést i nesprávným zemněním. Úkolem zemnění je především vytvořit pevný potenciál, který se bude brát jako referenční. Pokud by bylo zemnění nedostatečně kvalitní, mohli by vznikat rozdíly potenciálů, které by následně ovlivnily měření. Jelikož i kapalinou protékají zemnicí proudy okolních spotřebičů. Z principu funkce je kapalina spojena právě se zemním potenciálem, tato vlastnost je přímo žádoucí, jelikož zabraňuje akumulaci nábojů v kapalině, které by pak zkreslily měření [1-3].

Zdrojem neelektrického rušení jsou hydrodynamické poruchy v kapalině. Jejich vznik je poměrně jednoduchý, rychlostní profil kapaliny se deformuje na každém ohybu, spojení větví, špatně vyrovnané přírubě, ne zcela otevřené klapce atd., navíc vznikají v kapalině turbulence. Výrobci předepisují přísná pravidla montáže průtokoměrů, délku

rovného potrubí před i za průtokoměrem apod., při jejich nedodržení nezaručují udávanou přesnost [1-10].

Omezit vliv těchto poruch lze pouze dodržáním pravidel výrobce, podle [1-7] jsou to:

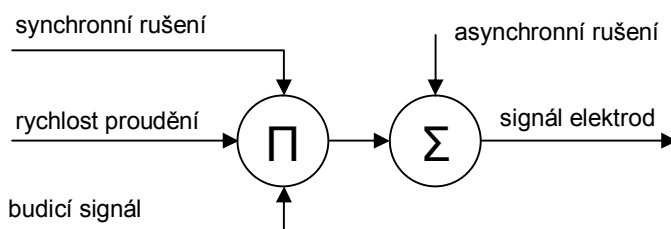
- brát v úvahu změny Reynoldsova čísla v měřicím rozsahu snímače
- použité potrubí musí být hladké a kontrolované z hlediska nepřítomnosti zdrojů hydromechanických poruch v délce alespoň $10 D$
- před snímačem a za ním musí být dostatečně dlouhé přímé úseky potrubí
- vnitřní průměr potrubí musí být neměnný v délce $4 D$ před snímačem
- v potrubí ani měřicí trubici snímače se nesmějí vyskytovat změny drsnosti povrchu, které mohou zapříčinit odtrhávání proudnic
- měřicí prvek musí být přesně vycentrován s tolerancí ne větší než $0,1 \text{ mm}$

Celková výsledná chyba je pak sumou všech dílčích chyb, zapříčiněných rušením nebo jinými negativními vlivy.

2.2 Základní vlastnosti synchronní detekce

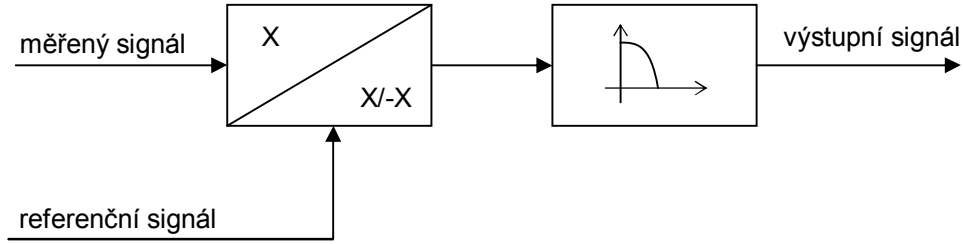
Synchronní detekce je technika zpracování signálů, která umožňuje separovat slabý signál, dokonce i pod úrovní rušení, avšak ke své činnosti potřebuje zdroj referenčního signálu s přesnou frekvencí a fází. Proto se používá velmi často v radiotechnice a také v měřicích obvodech indukčních průtokoměrů [2-1]. Její nejvýhodnější využití je v případech kdy máme přímo k dispozici referenční signál, což je případ indukčních průtokoměrů, kde můžeme referenční signál odvodit od budicího signálu.

Na signál získaný z elektrod indukčního průtokoměru můžeme nahlížet jako na amplitudově modulovaný signál, kde nosný kmitočet tvoří frekvence buzení magnetického pole a obálka signálu pak odpovídá rychlosti proudící kapaliny.



Obr. 2.1 Vznik signálu na elektrodách indukčního průtokoměru

Princip synchronní detekce vypadá následovně



Obr. 2.2 Princip synchronní detekce

Měřený signál násobíme referenčním signálem s přesnou frekvencí a fází, pak ho filtrujeme dolní propustí.

Každý periodický signál se dá popsat Fourierovou řadou, např.

$$x(t) = X_0 \cdot \sum_{k=1}^n X_k \cdot \sin(k\omega t + \varphi_k). \quad 2.1$$

Můžeme si průběh užitečného signálu jako

$$u_{sig}(t) = U_{sig} \cdot \sin(\omega_{sig} \cdot t + \Theta_{sig}) \quad 2.2$$

a průběh referenčního signálu obdobně

$$u_{ref}(t) = U_{ref} \cdot \sin(\omega_{ref} \cdot t + \Theta_{ref}). \quad 2.3$$

Amplitudovou modulaci dostaneme jednoduchým vynásobením těchto dvou signálů, tedy

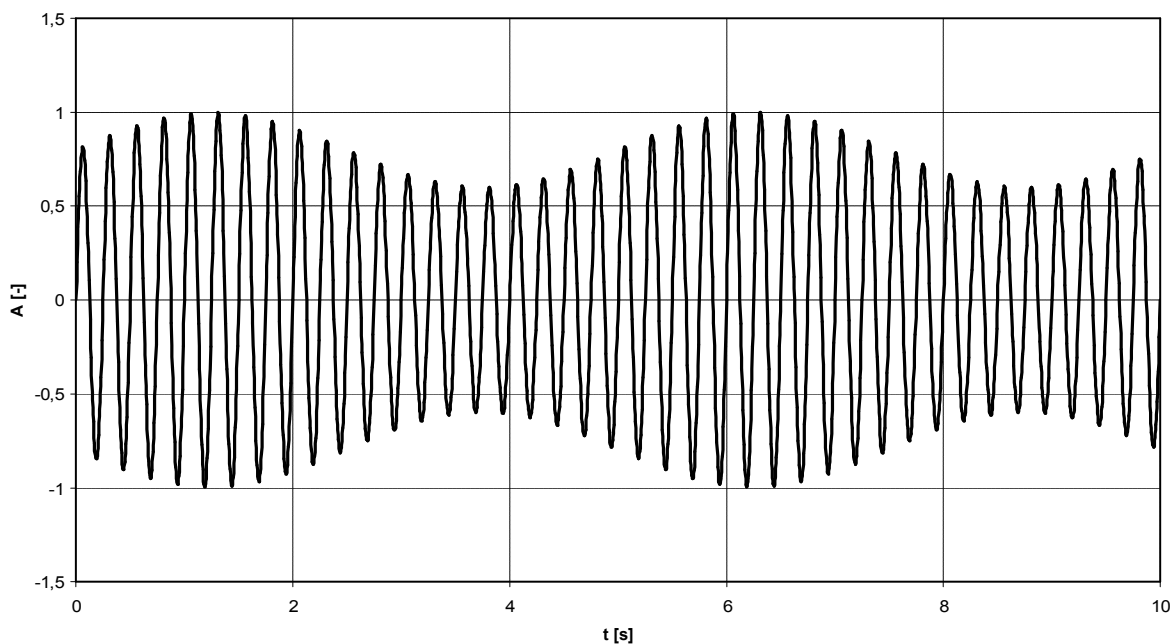
$$u_{sm}(t) = U_{sig} \cdot U_{ref} \cdot \sin(\omega_{sig} \cdot t + \Theta_{sig}) \cdot \sin(\omega_{ref} \cdot t + \Theta_{ref}). \quad 2.4$$

Úpravou dostaneme tvar

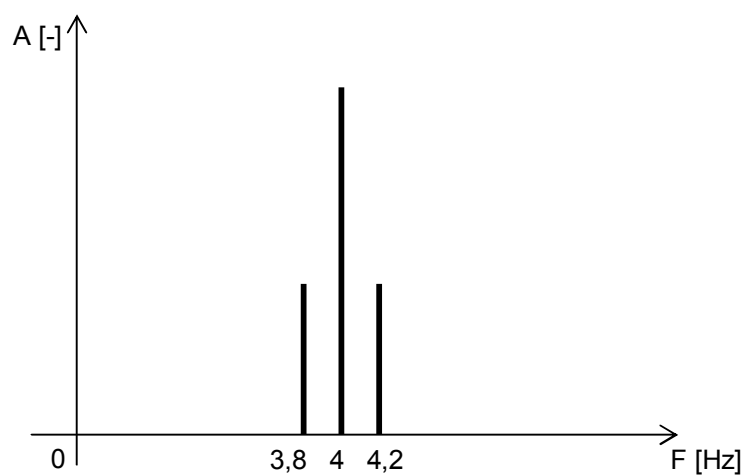
$$u_{sm}(t) = \frac{1}{2} \cdot U_{sig} \cdot U_{ref} \cdot \cos([\omega_{sig} - \omega_{ref}] \cdot t + \Theta_{sig} - \Theta_{ref}) - \frac{1}{2} \cdot U_{sig} \cdot U_{ref} \cdot \cos([\omega_{sig} + \omega_{ref}] \cdot t + \Theta_{sig} + \Theta_{ref}). \quad 2.5$$

Zde je vidět, jak záleží na fázi referenčního signálu.

Pokud bude referenční kmitočet např. 4 Hz a frekvence užitečného signálu $0,2\text{ Hz}$, pak bude takovýto signál vypadat následovně, viz obr. 2.3 a 2.4.

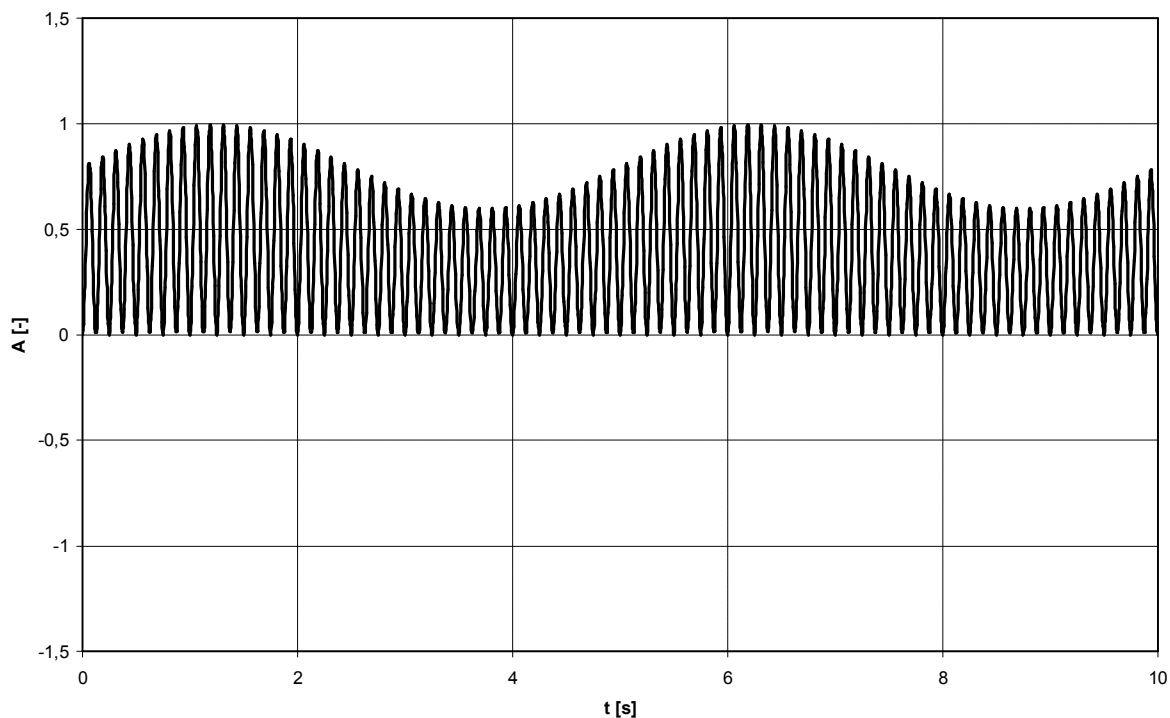


Obr 2.3 Amplitudově modulovaný signál

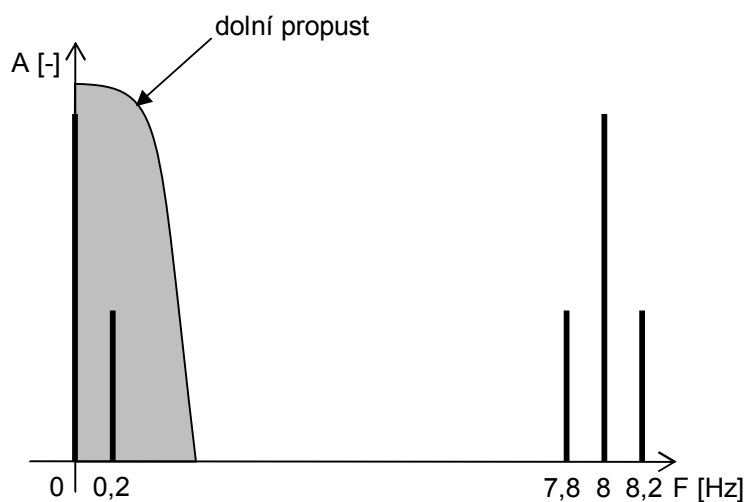


Obr. 2.4 Spektrum amplitudově modulovaného signálu

Pokud tento signál vynásobíme referenčním signálem se stejnou frekvencí a fází dostaneme viz. obr. 2.5 a 2.6.

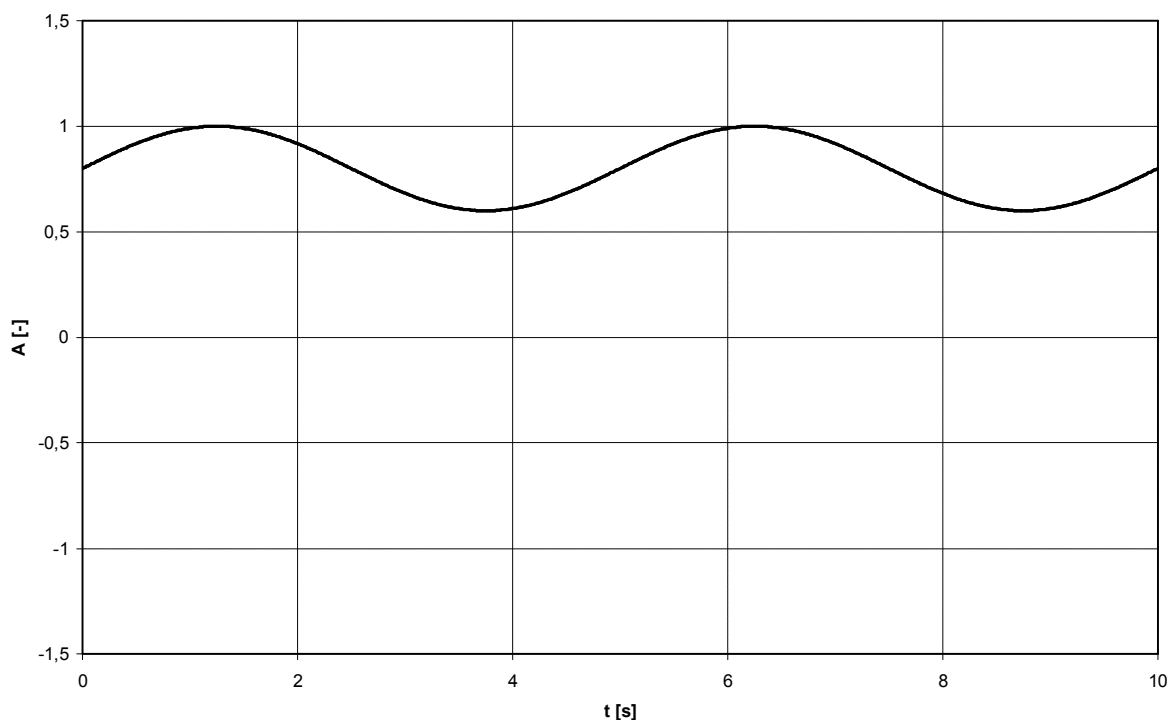


Obr. 2.5 Signál po vynásobení referencí



Obr. 2.6 Spektrum signálu vynásobeného synchronní frekvencí

Jak je z obrázku 2.6 patrné po filtraci dolní propustí zůstane ze signálu pouze užitečná složka. Šířku pásma filtru lze volit libovolně úzkou a tak odstranit téměř všechna rušení, avšak takovýto filtr bude mít příliš dlouhou časovou konstantu τ která způsobí pomalé reakce na změny signálu. Časová konstanta τ bývá v souvislosti s průtokoměry často nazývána *tlumení* [1-3].

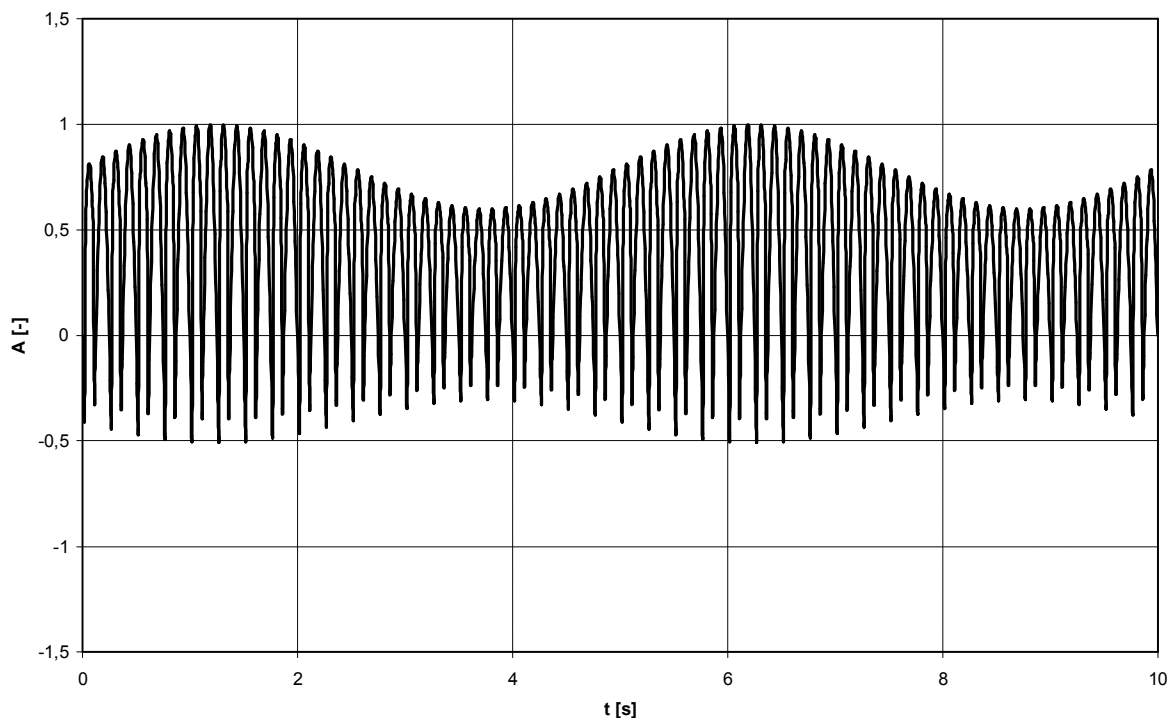


Obr. 2.7 Filrovaný signál

Analogová násobička je poměrně složitý a náchylný obvod, používá se často místo násobení signálů takzvané *spínačové detekce*. Násobička je nahrazena spínači. Funkce je stejná jako by se referenční signál nahradil obdélníkovým signálem, takovýto popis je zcela správný jak si ukážeme dále.

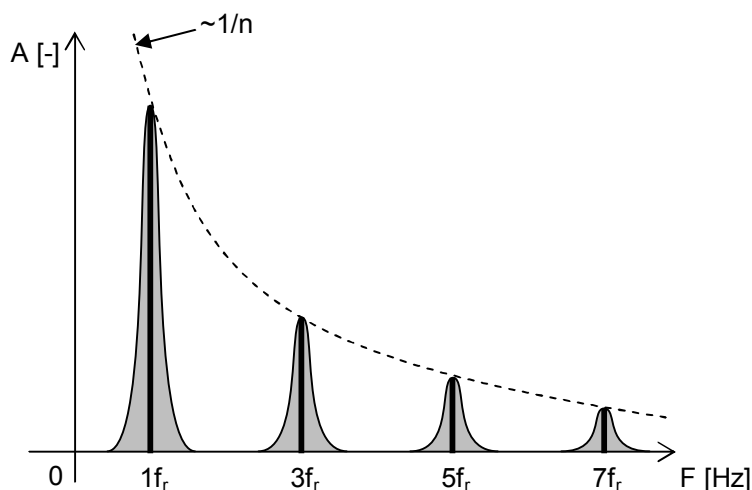
Výhody spínačové detekce jsou jasné, jednodušší provedení pouze se spínači a tím i nižší cena [2-1]. Nevýhodou je však citlivost i na vyšší frekvence než je referenční kmitočet.

Důvod citlivosti na vyšší frekvence je jednoduchý a vyplývá z chování, jako by signál byl násoben obdélníkovým referenčním signálem. Obdélníkový signál ve spektru obsahuje kromě základní frekvence i každou lichou vyšší harmonickou složku, ta nám pak přenáší do výsledného signálu i vyšší harmonické ze vstupního signálu viz. obr. 2.8.



Obr. 2.8 Signál vynásobený obdélníkovým signálem

Oproti použití harmonické reference, která má ve výstupním spektru pouze první propustné pásmo viz. obr. 2.9.



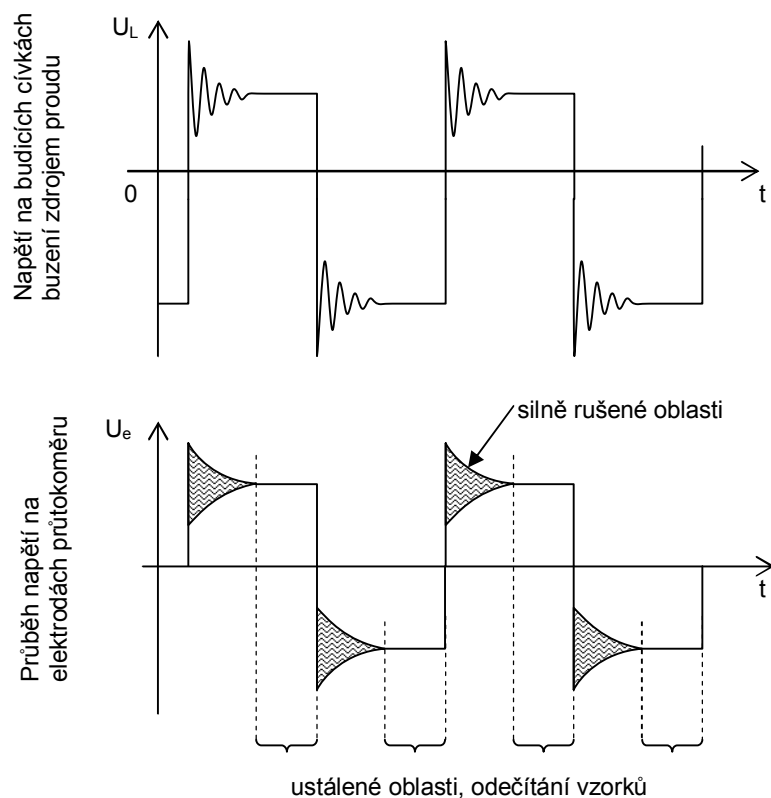
Obr. 2.9 Ekvivalentní přenosová charakteristika spínačové detekce

Signál fázově posunutý o $\pi/2$ nebude přispívat k výstupnímu napětí, dle rov. 2.5. Takovýto signál se nazývá kvadrurní složka [1-3], jejím příkladem jsou

napětí způsobená transformací nebo vířivými proudy, metoda synchronní detekce ji tedy významně potlačuje. Stejně tak potlačuje stejnosměrný offset vstupního signálu, vzniklý například termoelektrickým napětím na svorkách přírodních vodičů. Ve skutečnosti však fázový posun není zcela ideální a nedojde tak k úplnému potlačení rušivých signálů, další obtíže způsobují usazeniny na elektrodách pokud se chovají jako sériová kapacita a posouvají fázi užitečného signálu, pak dochází částečně i k jeho tlumení [1-3].

2.3 Potlačení rušení volbou průběhu magnetického pole

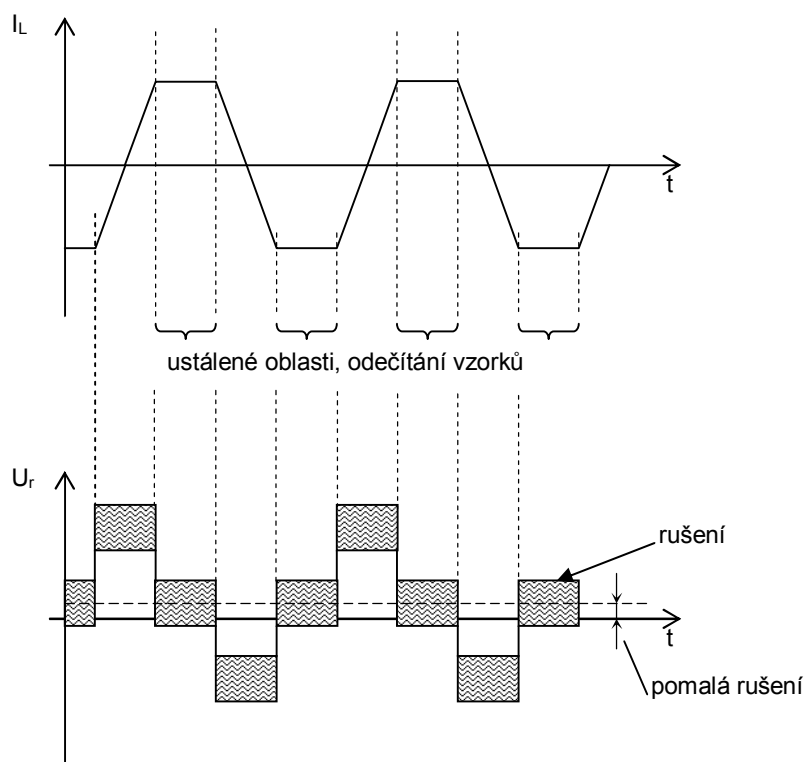
Jak bylo řečeno v kapitole 2.1., je rušení vířivými proudy a transformační napětí vyvoláno změnami magnetického pole, které je přímo úměrné strmosti jeho poklesu nebo růstu. Pokud bude $B(t) = konst.$ přesněji $\frac{d\Phi}{dt} = 0$, pak toto rušení nebude vznikat. Toto se přímo využívá, měří se pouze v oblastech kdy je právě $B(t) = konst.$, takto získaný užitečný signál neobsahuje synchronní rušení. Avšak pravoúhlý průběh magnetického pole je nerealizovatelný, z fyzikálního hlediska je nemožné docílit pravoúhlý průběh proudu indukčností. Můžeme se přiblížit zvýšením budicího napětí, tím však vzroste výkonová ztráta na budicích obvodech, jelikož se k buzení používají zdroje konstantního proudu a navíc to vede k zákmitům na budicích cívkách. Taktéž rychlý růst magnetického pole může na elektrodách měřidla vyvolat napětí tak velké, že dojde k přesycení vstupních obvodů a je nutné dodatečně čekat na jejich opětovné ustálení.



Obr. 2.10 Průběhy na indukčním snímači

2.3.1 Lichoběžníkový průběh magnetického pole

Uvažujeme-li obdélníkový průběh a omezíme u něj velikost první derivace v čase, dostaneme výhodnější lichoběžníkový průběh.



Obr. 2.11 Lichoběžníkový průběh napětí a průběh rušivých napětí

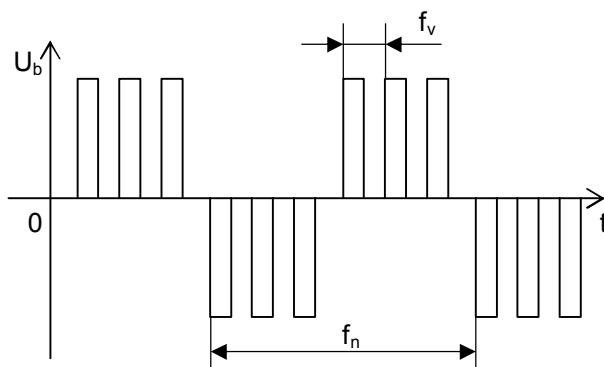
Budeme-li odečítat vzorky v ustálených oblastech, výrazně tak omezíme chybu způsobenou rušením. Pokud však budeme jako výstupní hodnotu brát rozdíl vzorků z kladné a záporné půlvlny, získáme tím dvojnásobnou citlivost. Předpokládáme-li také pomalé rušení, v oblasti jedné periody téměř neměnné, potlačíme úspěšně i toto. Odpadá tedy nutnost měření nulové velikosti rychlosti, jelikož je drift zesilovačů touto metodou z principu potlačen. Při synchronním odběru vzorků, vždy ze stejných míst průběhu, potlačíme i vliv synchronního rušení.

Při zpracování dat pomocí číslicové techniky je vhodné odebrat v jedné půlperiodě více vzorků, následným filtrováním dolní propustí, postačí i jednoduchá sumace, jenž má obdobné vlastnosti jako dolní propust, můžeme dosáhnout ještě lepších výsledků. Zde se již jedná o číslicovou synchronní detekci.

2.3.2 Magnetické pole o dvou frekvencích

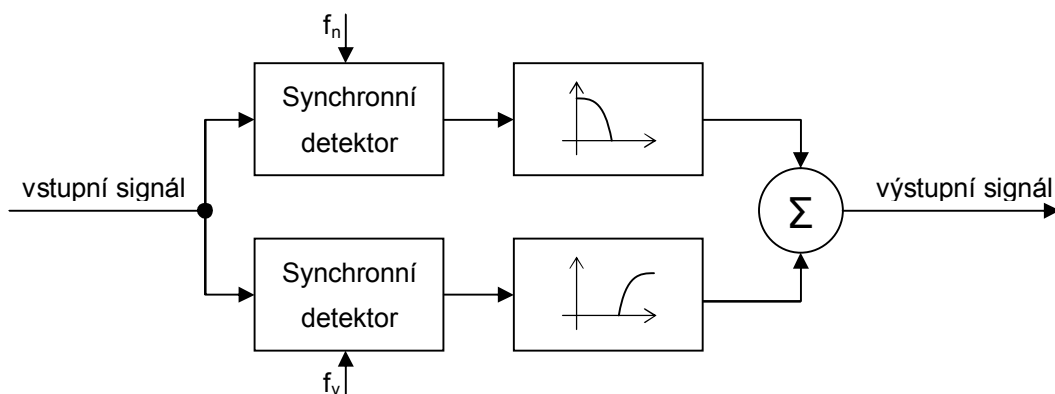
Aby byla dosažena maximální citlivost a stálost nuly volí se pracovní kmitočty poměrně nízko, 5-10Hz [1-3]. Pro potlačení malých střídavých napětí bývá voleno velké tlumení. To má za následek pomalé reakce průtokoměru na rychlé změny průtoku. Průtokoměry s vyššími pracovními kmitočty mají obvykle vyšší nejistotu měření [2-2].

Pro dosažení stálosti nuly a schopnosti měřit rychlé změny průtoku je možno použít buzení signálem vzniklým jako součet dvou frekvencí, nízké f_n a vysoké f_v . Takovýto průběh má pak následující tvar, viz. obr. 2.8.



Obr. 2.12 Průběh buzení principem dvou frekvencí

Signál získaný z čidla buzeného dvěma frekvencemi, vyžaduje zvláštní zpracování. Konkrétně se zpracovává odděleně pomalý a rychlý signál.



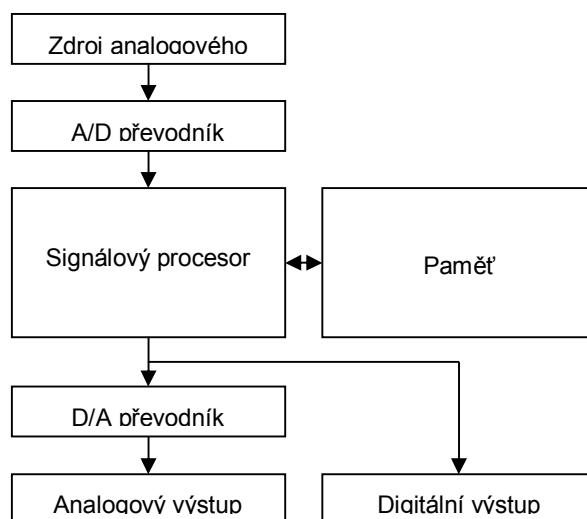
Obr. 2.13 Princip synchronní detekce signálu o dvou frekvencích

Vstupní signál je zpracováván synchronní detekcí, v pomalé větvi se zpracovávají pomalu se měnící změny průtoku. Naopak v rychlé části je zpracováván signál odvozený od buzení s vyšší frekvencí, dolní propust obsažená v synchronním detektoru může mít mnohem menší časové konstanty a zpracovávat tak rychlé změny průtoku. Horní propust na výstupu má za úkol propustit pouze rychlé změny průtoku a nepropustit rušení na nižších frekvencích. Takovéto průtokoměry jsou vhodné k měření rychle kolísajících průtoků, jako například u dávkovačů [2-2].

2.4 Zpracování signálu signálovým procesorem

Digitální signální procesor nebo také Digitální signálový procesor (zkratka DSP) je mikroprocesor, jehož návrh je optimalizován pro algoritmy používané při zpracování digitálně reprezentovaných signálů. Hlavním nárokem bývá průběžné zpracování velkého množství dat, při požadavku na rychlost jejich zpracování.

Klasické analogové obvody sloužící pro zpracování signálu se velmi obtížně nastavují, reprodukovatelnost analogových obvodů je též nesnadná a řeší se pomocí velkého počtu nastavitelných prvků, přičemž jakmile jsou vyrobeny, nelze jejich vlastnosti významně modifikovat. Ve srovnání s DSP je změna firmwaru procesoru velmi jednoduchá.



Obr. 2.14 Typický řetězec pro zpracování signálu v DSP

Na obrázku Obr. 2.14 je typické blokové schéma zařízení využívajícího DSP [2-3], jedná se o přímou náhradu analogového filtru. Analogový signál je nejprve převeden A/D převodníkem na signál digitální a v této podobě je zpracováván digitálním signálním procesorem. Zpracovaný digitální signál je D/A převodníkem zpět převeden na analogový. V mnoha zařízeních prochází signál tímto řetězcem v reálném čase, pouze se zpožděním nutným pro vykonání potřebných výpočtů a v případě použití nekauzálních výpočtů je zpoždění nutné z principu funkce. V některých zařízeních je ovšem použita jen část typického řetězce, nebo je použit celý, ale obě části, vstupní a výstupní se využívají odděleně, zpracovávají jiný signál. Příkladem může být generátor budícího průběhu a synchronní detektor.

3 Návrh obvodového a HW řešení

Návrh převodníku signálu je dán požadavky firmy EESA. Tyto požadavky pocházejí ze stávajících trendů trhu a techniky. Prudce a perspektivně se rozvíjející odvětví signálových procesorů spolu s klesajícími cenami, přímo vybízí k jejich použití. Navíc možnost měnit software v procesoru je mnohem méně nákladné než měnit celé obvodové řešení. Velmi žádanou schopností moderních průtokoměrů je možnost detekovat přítomnost média v potrubí. Indukční průtokoměry s bodovými elektrodami nejsou schopny korektně měřit ne zcela zaplněné potrubí, ukazují nadměrný, neexistující průtok.

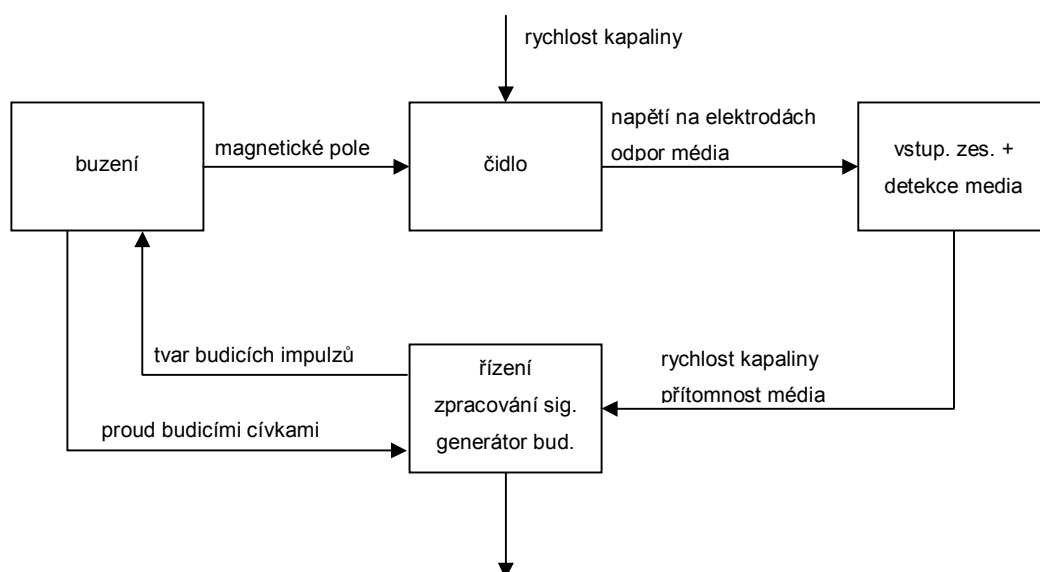
3.1 Rozbor požadavků

Jak již bylo řečeno, žádané vlastnosti jsou dány dle požadavků firmy EESA a lze je stručně shrnout do několika bodů.

Průtokoměr by měl mít následující vlastnosti:

- možnost volit průběh buzení
- měřit proud budicími cívkami
- digitálně zpracovávat měřený signál
- umožnit detekci média v potrubí
- mít minimální spotřebu/ztrátový výkon

Podle těchto požadavků lze již navrhnout blokové schéma obr. 3.1, spolu se signály mezi bloky. Schéma se nám dělí na celkem tři nezávislé funkční části, které je možno navrhnout samostatně. Tyto tři části tvoří výkonový modul budicích cívek, modul vstupního zesilovače s detekcí média a řídicí modul se signálovým procesorem pro zpracování signálu a řízení. Modulární stavba je výhodná z hlediska snadnější konstrukce a případných dodatečných změn.



Obr. 3.1 Blokové chéma průtokoměru

3.2 Vstupní zesilovač a detekce zaplnění potrubí

Zpracovat signál z elektrod průtokoměrného čidla není jednoduchá záležitost vzhledem k jeho elektrickým parametrům. Zde je třeba si uvědomit parametry proudící kapaliny, dle rov. 1.29 nebo 1.30, se může vnitřní odpor pohybovat v rozmezích od $10k\Omega$ do $200k\Omega$, velikost pronikajícího asynchronního rušení $0,5\text{ mV}$ až 2 mV , viz. kap. 5.2, a užitečný signál dosahuje amplitudy cca. 2 mV , platí pro vodu o běžné vodivosti $\rho \cong 200\mu S$. Pokud je žádána přesnost měření, je nutno věnovat se co nejvyššímu potlačení všech rušení, aby měli výsledky reprodukovatelnost a přesnost.

Přibližné postupy odstranění rušení jsou popsány v kapitole 2. Podrobným rozбором dospějeme k rozhodnutí o zpracování signálu pomocí synchronní detekce, a můžeme tedy stanovit požadavky na vstupní zesilovač.

Vstupní zesilovač musí mít tyto vlastnosti:

- co možná nejvyšší velikost potlačení souhlasného napětí, CMMR
- velkou přesnost zesílení
- velmi malý offset
- velmi malé zbytkové proudy
- dostatečnou šířku přenášeného pásma
- nízkou tepelnou závislost
- schopnost operovat do hranic napájecího napětí, Rail-to-Rail

Takto zesílený signál již může být převeden na digitální informaci a synchronní detekci provedeme již číslicově. Zde můžeme diskutovat vhodný typ A/D převodníku. Zřejmě nejvýhodnější bude volit převodník typu Σ - Δ , pro své vlastnosti jako stálost a přesnost. Největší výhodou je, že takovýto převodník nemá na vstupu vzorkovací obvod, je z principu funkce odolnější proti šumu na vstupním signálu.

Požadované vlastnosti A/D převodníku:

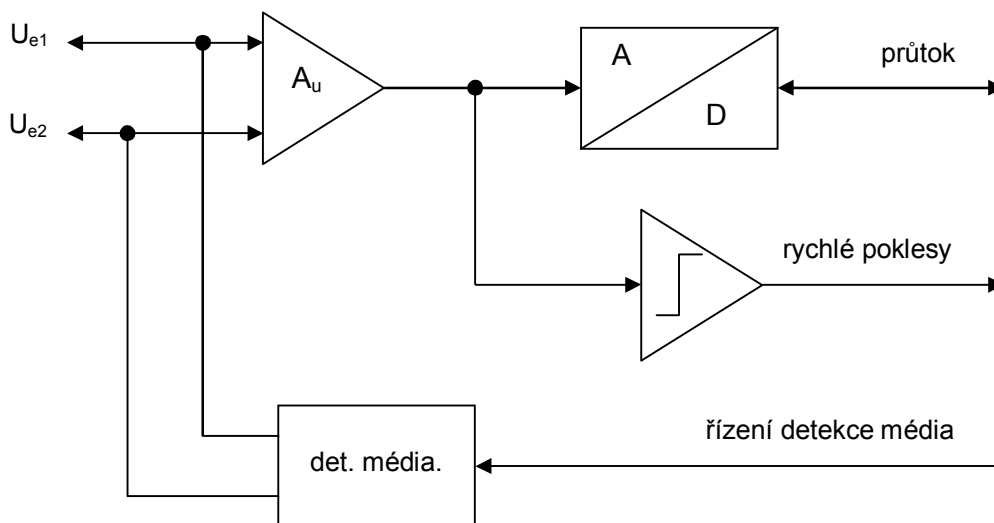
- převodník typu Σ - Δ
- dostatečná rychlost vzorkování
- dostatečná přesnost
- nízká tepelná závislost
- sériové výstupní rozhraní
- dodatečně, integrovaná napěťová reference

Další součástí převodníku má být detekce média. Detekce média se historicky řeší pomocí dodatečných elektrod, toto řešení má nespornou výhodu v oddělení elektroniky měřicí od detekční, avšak více elektrod sebou přináší zvýšenou finanční náročnost. V současnosti se měření průtoku pro ne zcela zaplněná potrubí řeší pomocí půlprstencových elektrod [3-1]. Nyní již mohou být společné elektrody pro měření a detekci, především z toho důvodu, že jsou dostupné dostatečně kvalitní analogové elektronické spínače. Půlprstencové elektrody jsou taktéž mnohem dražší než bodové elektrody. Pro průtokoměry s bodovými elektrodami zde máme problém popsany v kapitole 2., a to neschopnost měřit průtok s vysokým obsahem vzduchových bublin, proto je výhodné průtokoměr vybavit obvodem, který ověří, že měřené výsledky jsou

relevantní a nikoliv falešné, způsobené vzduchovými bublinami nebo kapsami v médiu. Tudíž se nejedná o průtokoměr pro ne zcela zaplavené potrubí.

Princip detekce média, který s sebou neobnáší změny průtokoměrného čidla, je měření odporu vodivého kanálu mezi elektrodami. To ovšem není tak jednoduché, jak se zprvu zdá. V potaz se musí vzít extrémní vstupní odpor zesilovače (typ $20\text{ M}\Omega$), proměnlivost velikosti odporu vodivého kanálu ($10\text{--}200\text{ k}\Omega$), detekce média nesmí ovlivnit přesnost a citlivost měření průtoků. Druhou obtíží je nemožnost stejnosměrného měření odporu, kvůli možným elektrochemickým reakcím na povrchu elektrod, které by následně ovlivnily samotné měření. Nabízí se možnost využít obvody pro měření rychlosti proudící kapaliny pro měření odporu kanálu. Tato varianta je možná a výhodná, ale je nanejvýš vhodné tyto obvody navíc ještě doplnit o detekci rychlých poklesů vodivosti kanálu. Nejjednodušší a je doplnit za vstupní zesilovač komparátor, který detekuje stav, kdy se zesilovač dostane do saturace, tak může signalizovat i další poruchové stavy.

Takto teoreticky sestrojený odvod můžeme nekreslit v podobě blokového schématu, viz. obr. 3.2.



Obr. 3.2 Blokové schéma vstupního modulu průtokoměru s detekcí média

Ze schématu je patrné, že obvod detekce média je přímo napojen na elektrody, z toho plynou požadavky na analogový spínač, který je bude připojovat. Ještě si však musíme uvědomit, jaké signály budeme spínat. Pro využití měřicí části elektroniky k měření odporu kanálu, bude nejvýhodnější simulovat signály vznikající na čidle za provozu. Z jednoduché představy kdy detektor s odporem mezi elektrodami čidla tvoří

napětíový dělič, zvolíme velikost připojovaného napětí na elektrody a vnitřní odpor. Aby byla citlivost nejvyšší, je vhodné volit vnitřní odpor detektoru rovný velikosti vnitřního odporu média, s určitou rezervou, a obdobně volíme napětí na dvojnásobek maximálního možného napětí vyvolaného rychlostí proudící kapaliny.

Analogový spínač tedy musí splnit:

- maximální odpor v rozepnutém stavu
- minimální zbytkové proudy
- schopnost spolehlivě spínat napětí v řádech jednotek mV
- spínat proud obou polarit

Dle požadavků byli zvoleny následující integrované obvody pro jednotlivé funkce:

- vstupní zesilovač, INA331, přístrojový přesný zesilovač s CMMR 94 dB
- A/D převodník, AD7793, Σ - Δ převodník se sériovým výstupem, $16/24\text{ bit}$
- analogový spínač, ADG709, 2×4 kanálový multiplexer, zbytl. proud do 1 nA

Konkrétní parametry obvodů jsou k dispozici v příložených katalogových listech.

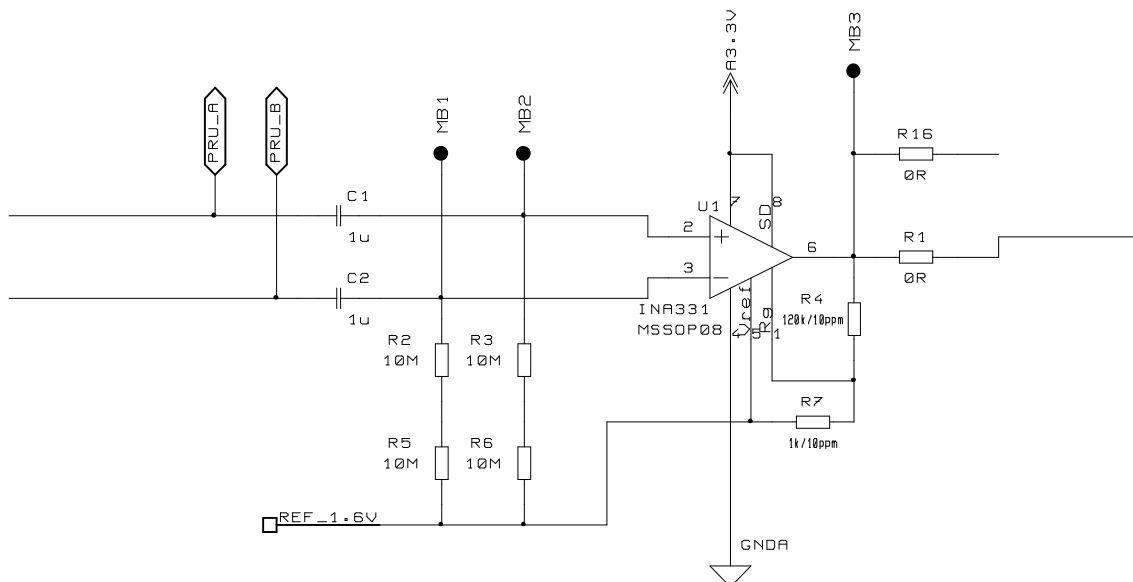
U vstupního zesilovače je rozhodující jeho kvalita (dána použitým přístrojovým zesilovačem INA331) a vhodně nastavené zesílení. Čím bude zesílení vyšší, více se využije rozsah zesilovače i následujícího A/D převodníku.

Napětí vyvolaná parazitními vlastnostmi určíme jako součet vstupního offsetu zesilovače, teplotní závislosti a zbytkového proudu výstupy.

Zbytkové proudy tečou výstupy skrze odpory R_2 , R_5 a R_3 , R_6 o celkové hodnotě $20\text{ M}\Omega$ detail viz. obr. 3.3. Katalogový list udává maximální velikost 10 pA , vyvolají tedy rozdílové napětí $200\text{ }\mu V$. Chybu vstupního offsetu udává výrobce $500\text{ }\mu V$. Chyba vstupního offsetu vyvolaná změnou teploty je maximálně $1,7\text{ mV}$. Užitečný signál na vstupu zesilovače dosahuje úrovně 2 mV . Součtem těchto napětí dostaneme maximální úroveň vstupního signálu. Rozdílové napětí na vstupu tedy dosahuje úrovně až $4,4\text{ mV}$. Vstupní zesilovač je typu rail-to-rail, výstupní signál může být v rozsahu napájecího napětí. Maximální napětí bude podíl napájecího napětí maximálního vstupního. Maximální zesílení je tedy $\frac{3,3}{4,4 \cdot 10^{-3}} = 750$.

Zesílení se nastavuje pomocí odporů R4 a R7 viz. obr. 3.3. Je dáno vztahem

$$G = 5 \cdot \left(1 + \frac{R_4}{R_7} \right) = 5 \cdot \left(1 + \frac{120 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^3} \right) = 600.$$



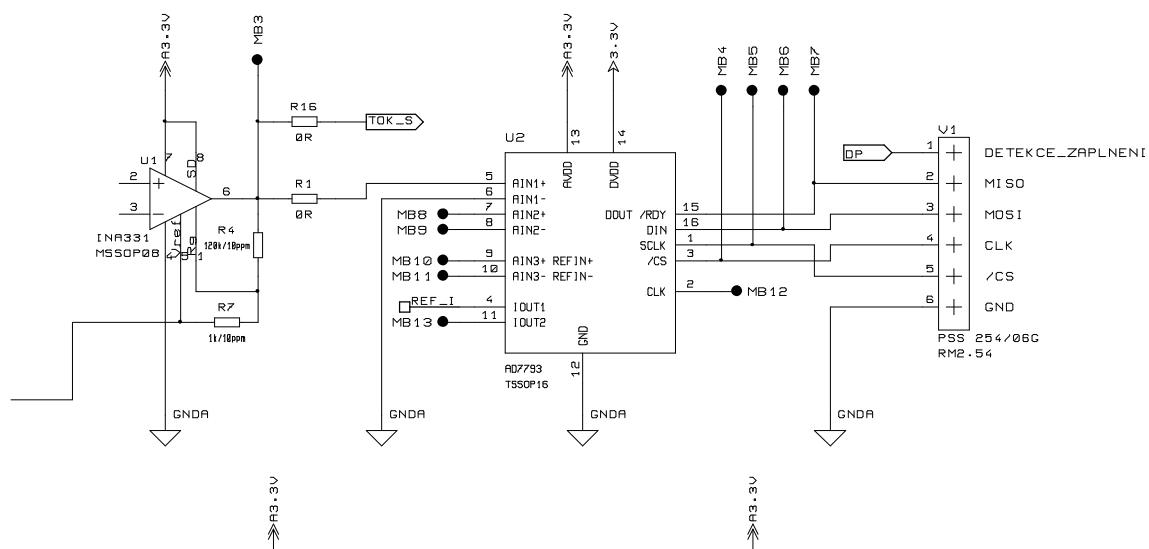
Obr. 3.3 Vstupní zesilovač, výřez ze schématu

Hodnota zesílení byla zvolena s bezpečnostním koeficientem 0,8 na $600\times$. Vliv změny referenčního napětí se na výstupu neprojeví, jelikož dojde k potlačení souhlasných napětí. Taktéž změny výstupního stejnosměrného offsetu se na údaji průtoku neprojeví, jelikož dojde k jejich potlačení při synchronní detekci signálu. Chyba měření je tak potlačena metodou zpracování naměřených údajů. Výsledná chyba měření tak bude součtem chyby zesílení zesilovače a chybou převodu A/D převodníku. Při 16-ti bitovém rozlišení dosahuje chyba způsobená parazitními vlastnostmi hodnoty do 0,03 %.

Kompletní schéma viz. příloha B.

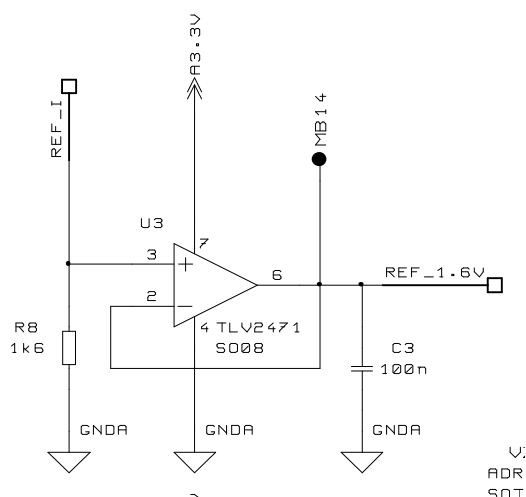
Popis funkce:

Signál z elektrod je přiveden na svorkovnici V2, odkud putuje přes vazební kondenzátory C1 a C2 na vstup přístrojového zesilovače U1. Vazební kondenzátory jsou použity z důvodu oddělení potenciálů na vstupu zesilovače. Přes dvojice odporů R2, R5 a R3, R6 je vstup připojen na referenční napětí. Přístrojový zesilovač U1 má nastaveno zesílení pomocí odporů R4 a R7 na hodnotu $600\times$. Odporů R4 a R7 je vhodné volit co nejpresnější a teplotně nezávislé z důvodu udržení přesnosti měření.



Obr. 3.4 A/D převodník

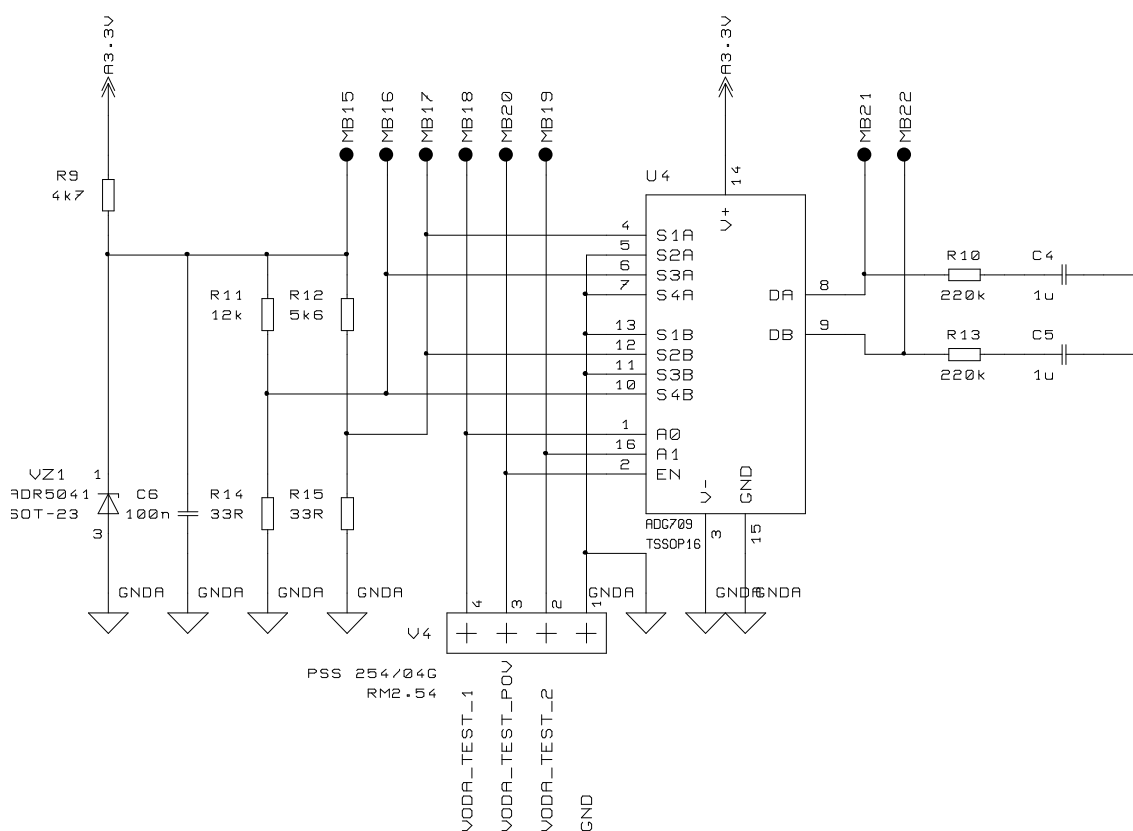
Zesílený signál je veden na vstup A/D převodníku U2 a následně již jako digitální informace je vyvedeno rozhraní SPI na svorkovnici V1. A/D převodník U2 má vestavěnou proudovou referenci, a spolu s rezistorem R8 vytvářejí zdroj referenčního napětí, které je následně výkonově zesíleno operačním zesilovačem U3, zapojeným jako napěťový sledovač viz. obr. 3.5.



Obr. 3.5 Napěťová reference

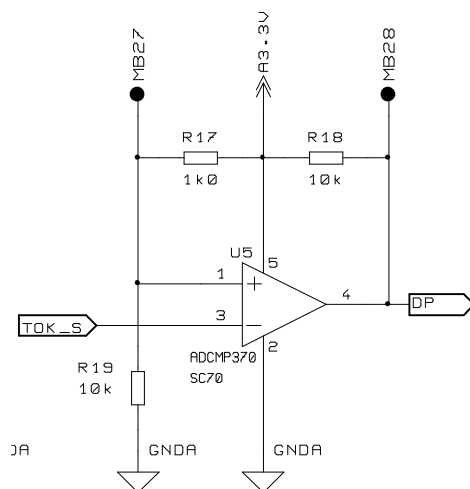
Toto referenční napětí je použito jako virtuální nula pro vstup a offset zesilovače U1.

Detekce média v potrubí je tvořena nejprve druhým zdrojem referenčního napětí o hodnotě 1,2 V. Skládá se z R9 a přesné reference VZ1. Toto referenční napětí je napěťovým děličem R12,R15 sníženo na vhodnou velikost (4 mV) a přivedeno na vstup multiplexeru U4. Dělič R11, R14 může sloužit jako druhý rozsah (8 mV) nebo pokud se neosadí odpor R11 může být této konfigurace použito k měření stejnosměrného offsetu. Multiplexer U4 je řízen samostatně skrze svorkovnici V4, jeho vstupy jsou zapojeny tak, aby vždy bylo na jednom výstupu dělené referenční napětí a na druhém nula. Tyto testovací signály jsou přes odpory R10 a R13, mající funkci vnitřních odporů, a oddělovací kondenzátory C4 a C5 přivedeny zpět, přímo na vstup elektrod čidla.



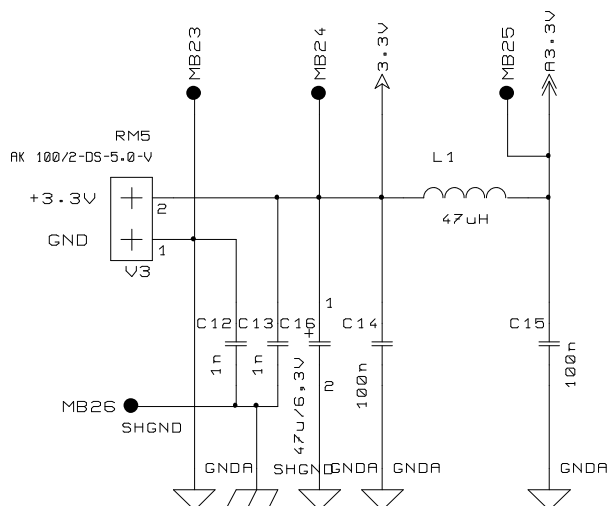
Obr. 3.6 Generátor testovacího signálu

Přítomnost média je pak sledována komparátorem U5, ten sleduje napětí na výstupu zesilovače U1 a porovnává jej s napětím na děliči tvořeným odpory R17 a R19, které jsou nastaveny těsně pod napájecí napětí na 3,0 V viz. obr 3.7. Odpor R18 slouží k definování úrovně pro komparátory s výstupem typu „otevřený kolektor.“



Obr. 3.7 Komparátor detekce zaplnění

Napájecí napětí 3,3 V se připojuje na svorkovnici V3, celková spotřeba obvodu je do 3 mA, bez referenčního proudu který může dosahovat hodnoty 1 mA. Na napájení není ochrana proti přepólování! Napětí je filtrováno kondenzátory, pro analogovou část ještě dodatečně tlumivkou L1. Stínění je připojeno přes kondenzátory C12 a C13 k napájení, aby nevznikaly nadbytečné kapacitní vazby mezi signály a zemí. Pokud by se jako výhodnější ukázalo stínění připojit k zemi, jednoduše nahradíme kondenzátor C12 nulovým odporem viz. obr 3.8.



Obr. 3.8 Napájení převodníku

3.3 Buzení

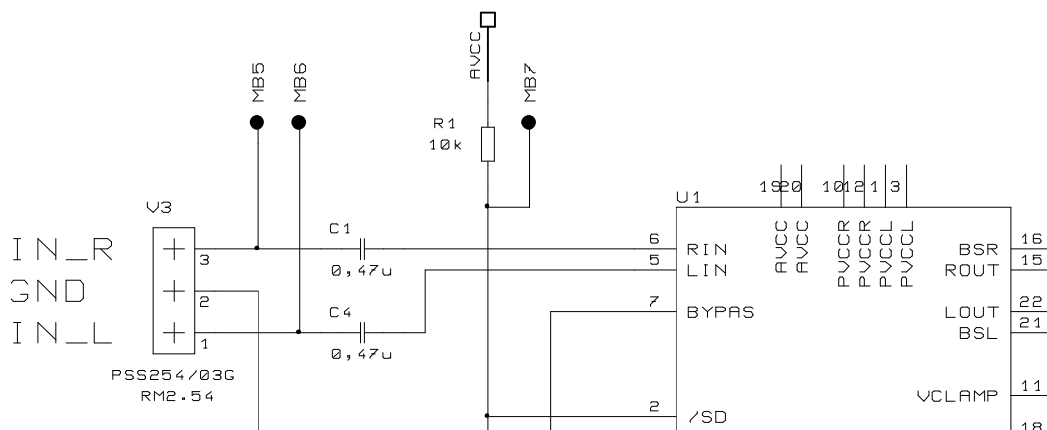
V kapitole 2.3. byl popsán vliv tvaru budicího magnetického pole na vznik rušení vlivem vířivých proudů a transformací napětí. Proto je nanejvýš vhodné mít možnost měnit tvar budicího pole, toto jsou hlavní důvody požadavku firmy EESA právě na možnost měnit tvar budicích impulsů. Zde již nevystačíme s jednoduchým zdrojem proudu napájecím H-můstek. Budeme potřebovat generátor průběhu signálu a jeho výkonový zesilovač. O generaci budicího signálu se postará řídící deska, výkonové posílení musíme zajistit externě. Dalším z požadavků byla možnost měřit velikost ustáleného proudu budicími cívkami a pokud možno co nejvíce omezit spotřebu. Z hlediska spotřeby se nabízí možnost použití spínaného zdroje, avšak úprava takového zdroje tak, aby dynamicky měnil výstupní napětí a přenášel dostatečné pásmo, by byla značně náročná. Zde se přímo nabízí využít některý z moderních integrovaných audio-zesilovačů pracujících v třídě D.

Z dostupných obvodů byl vybrán integrovaný obvod firmy Texas Instruments TPA3121D2, jedná se o stereo zesilovač s výstupním výkonem 15 W, bližší informace naleznete v katalogovém listu součástky který je přiložen v dokumentaci. Tento zesilovač se vyznačuje minimem externích součástek, vysokou účinností a odděleným napájením vstupní a výkonové části, které využijeme pro měření proudu budicími cívkami.

Schéma zapojení budicího modulu naleznete v příloze C.

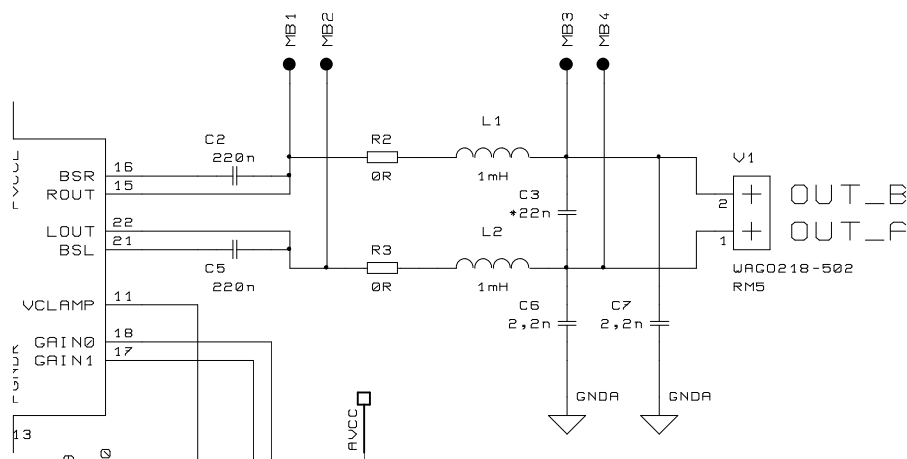
Popis funkce:

Jedná se o téměř katalogové zapojení zesilovače zapojeného do můstku, tedy oba kanály zesilují tentýž signál, ale v protifázi. Tímto způsobem lze dosáhnout až teoreticky čtyřnásobného výkonu dodaného do zátěže při stejném napájení. Zapojení je však doplněno o několik úprav, které umožňují v době nečinnosti obvod uspat, po dobu detekce média, a měřit proud výstupními výkonovými spínači, pro udržení konstantní intenzity magnetického pole s měnicími se okolními podmínkami.



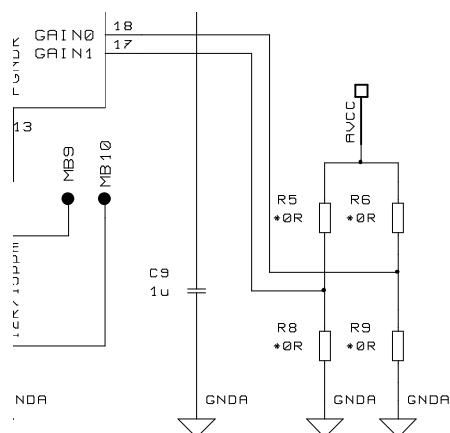
Obr. 3.9 Vstup zesilovače

Vstupní signál je přiveden na svorkovnici V3, odkud přes vazební kondenzátory vedou do integrovaného zesilovače U1.



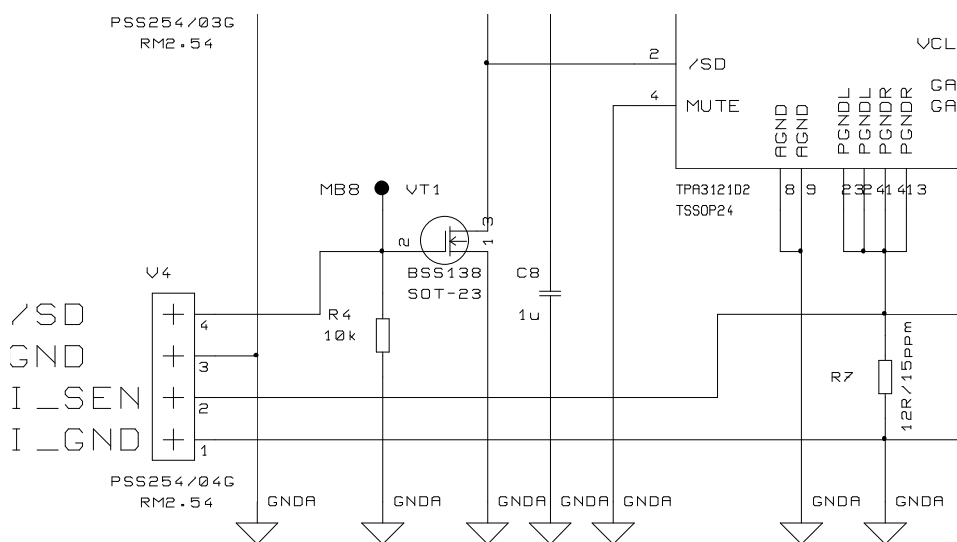
Obr. 3.10 Výstup zesilovače a výstupní filtr

Výstup je opatřen zpětnovazebními kondenzátory C2 a C5. Dále pak již výkonový signál vede do výstupního filtru tvořeného indukčnostmi L1, L2 a kondenzátory C6, C7. Hodnoty součástek výstupního filtru musely být uzpůsobeny k neobvyklému použití, jelikož při použití standardních filtrů pro akustické měniče docházelo k zákrmitům na výstupu zesilovače.



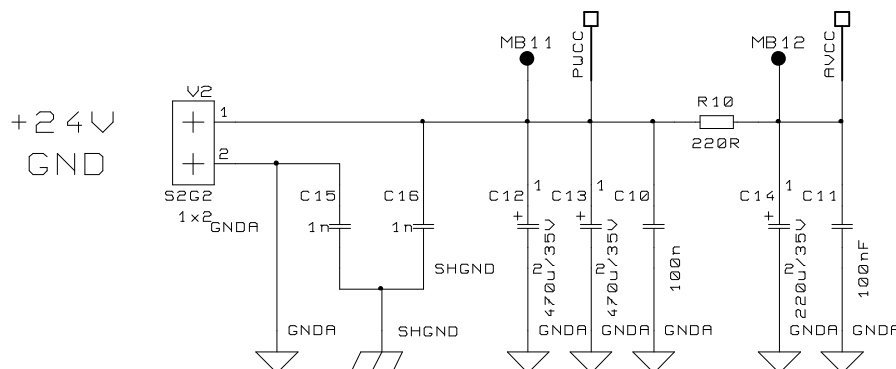
Obr. 3.11 Nastavení zesílení

Zesílení zesilovače se nastavuje ve čtyřech úrovních pomocí nulových odporů R5, R6, R8 a R9, více viz. dokumentace k integrovanému zesilovači. Nikdy však nesmí dojít k osazení R5 a R8 nebo R6 a R9 najednou! Došlo by ke zkratu na zdroji napětí.



Obr. 3.12 Snímání proudu a uspání zesilovače

Signál o proudu výstupními tranzistorem je odebírán z rezistoru R7 a je rovnou přiveden na svorkovnici V4 k dalšímu zpracování. Signál pro uspání zesilovače U1 je oddělen pomocí tranzistoru VT1, a může tak být ovládán přímo 5 V nebo 3,3 V logikou.



Obr. 3.13 Napájení zesilovače

Napájecí napětí o velikosti 24V se přivádí na svorkovnici V2, kde je filtrováno kondenzátory C12 a C13. Spotřeba v režimu spánku je do 1 mA, při buzení cívek pak 30 mA + budicí proud. Napětí pro napájení analogové elektroniky, respektive vstupních obvodů, je navíc dodatečně filtrováno RC článkem R10, C14 dle doporučení výrobce. Stínění je standardně připojeno přes kapacity C15 a C16 k napájení, v případě potřeby lze nahradit kondenzátor C15 nulovým odporem a připojit tak stínění na zem.

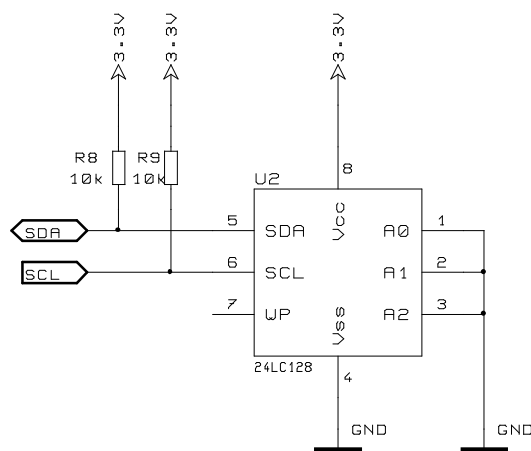
3.4 Řízení a zpracování signálu

Jak bylo řečeno výše je zde požadavek na zpracování signálu pomocí digitální synchronní detekce vznesený přímo firmou EESA. Důvod je jednoduchý, cíl omezit co nejvíce náchylnou analogovou elektroniku a nahradit ji pružnější programovatelnou digitální elektronikou. Metoda synchronní detekce a její vlastnosti jsou popsány v samostatné kapitole 2.

Řídící modul musí obsahovat A/D převodník pro měření proudu budicími cívkami. D/A převodník pro generaci průběhu budicích cívek. Dále sériový kanál pro komunikaci se vstupním modulem. Samozřejmě musí mít také dostatečný výpočetní výkon a paměťový prostor, pro dostatečně rychlé zpracování dat. Vzhledem k výpočetní přesnosti a objemu dat, zde bude výhodné místo běžného procesoru použít přímo signálový procesor lépe vyhovující požadavkům. Mnoho z nich má všechny požadované periferie již přímo integrovány.

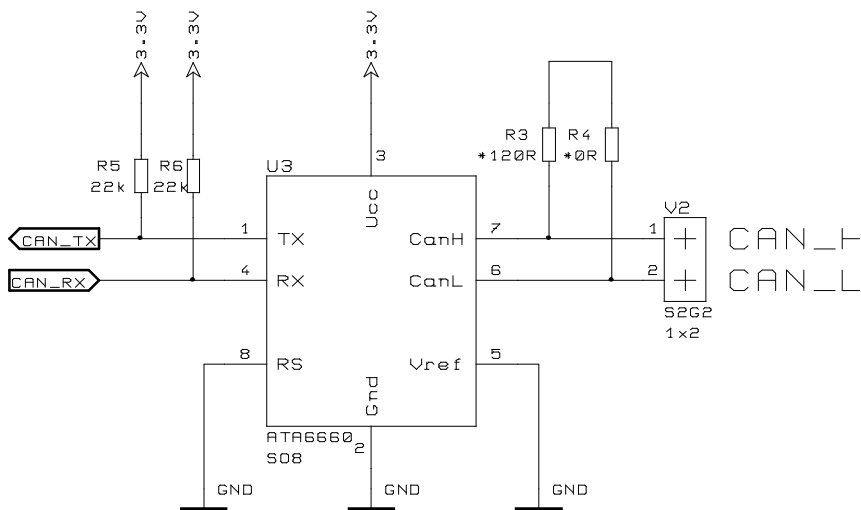
Podle těchto stanovených požadavků byl vybrán signálový procesor TMS320F2801 firmy Texas Instruments, je vybaven SPI kanálem, CAN řadičem, A/D a D/A převodníky. Především existuje kompilátor pro programovací prostředí LabView

K procesoru je připojena pomocí sběrnice I2C (IIC) sériová paměť U2 typu 24LC128 pro uložení konstant a převodních dat.



Obr. 3.15 Sériová paměť

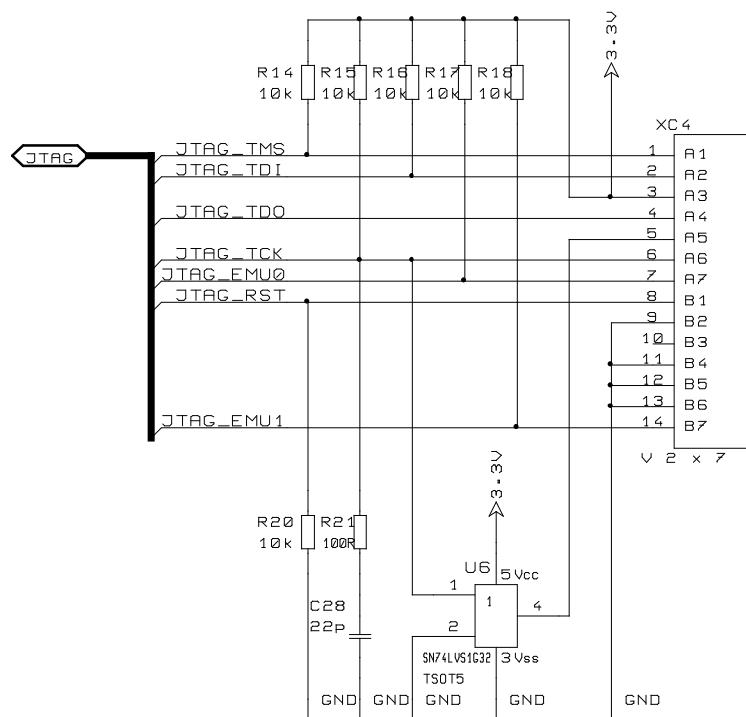
Jelikož je procesor U1 vybaven CAN řadičem, je tento vyveden k budiči U3. Rezistory R14 a R15 slouží jako ukončovací rezistory pro potlačení odrazů na koncích CAN vedení připojeného ke svorkovnici V2.



Obr. 3.16 Budič CAN

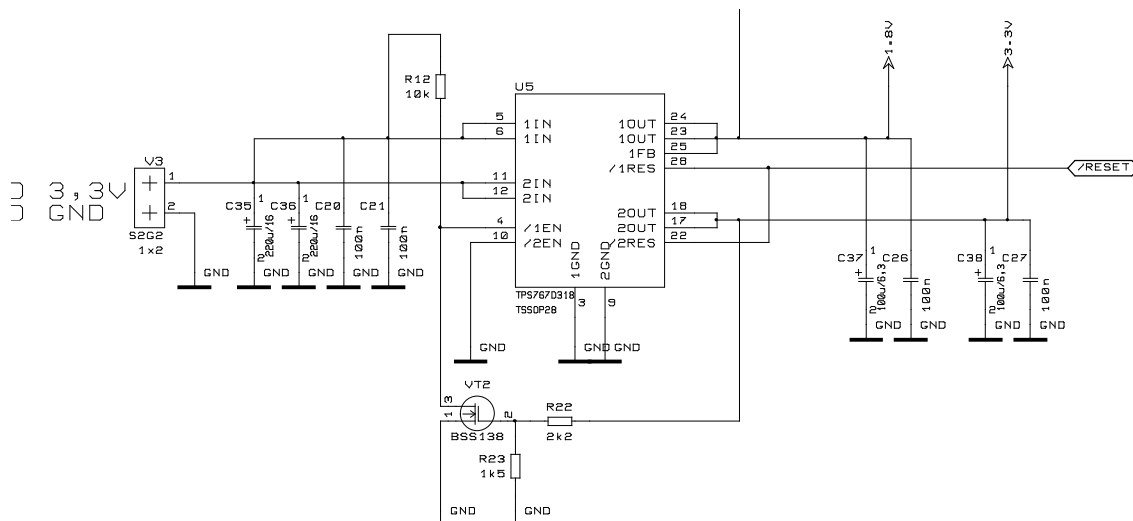
Na port VC1 je vyvedeno 8 analogových vstupů vybavených 10-ti bitovým A/D převodníkem. Port XC2 může být konfigurován jako PWM výstup nebo analogový výstup, má celkem 12 linek. Port XC3 obsahuje 8 standardních digitálních vstupně výstupních portů. Na svorkovnici V4 je vyvedeno rozhraní SPI, signál Chip Select označovaný /CS je brán z portu IO0.

Port XC4 obsahuje doporučené zapojení rozhraní JTAG, sloužící pro programování obvodu a ladění aplikací, jelikož umožňuje sledovat vnitřní proměnné za běhu programu.



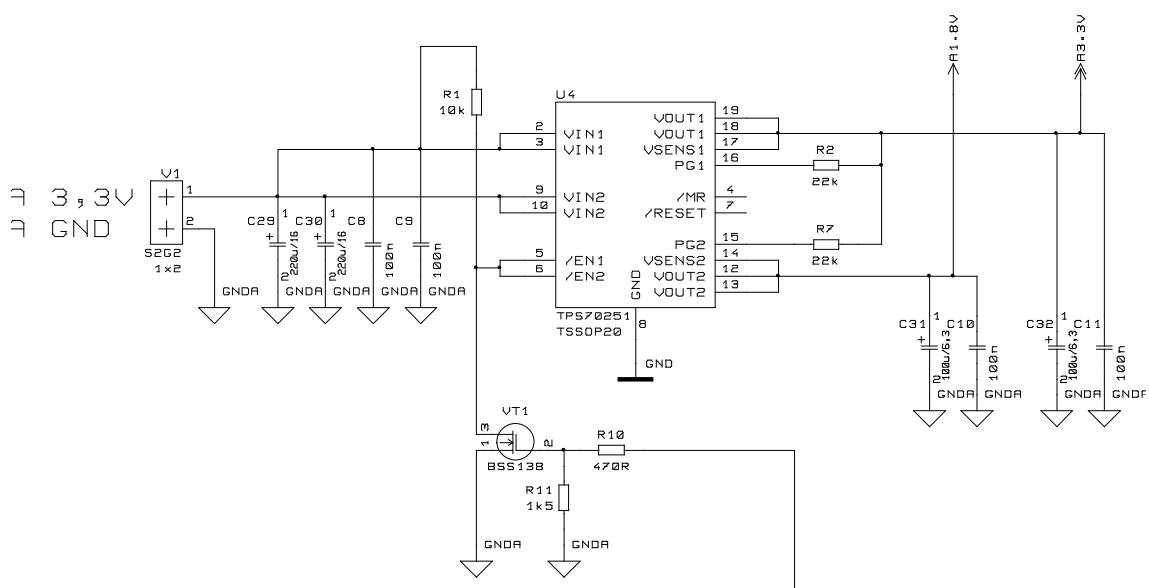
Obr. 3.17 Rozhraní JTAG

Na svorkovnici V2 je přiváděno napětí 3,3 V pro analogovou část a na svorkovnici V3 je přiváděno napětí 3,3 V digitální části modulu. Obě tato napětí jsou následně filtrována kondenzátory C31 až C34. Střední odběr by se dle katalogových údajů měl pohybovat okolo 120 mA. Následují dvojité stabilizátory napětí U4 a U5. Stabilizátor U5 slouží pro stabilizaci napětí napájejících napětí na 1,8 V a 3,3 V. Tento obvod je navíc vybaven napěťovým superviserem a slouží tak i jako generátor resetovacího signálu viz. obr. 3.18.



Obr. 3.18 Stabilizátor pro digitální část obvodů

Obdobně slouží i stabilizátor U4, stabilizuje napětí pro analogovou část modulu, na 1,8 V a 3,3 V. Výstupní napětí je opět filtrováno kondenzátory C35 až C38. Tranzistory VT1 a VT2 slouží k logickému spínání posloupnosti napájení, nejprve digitální 3,3 V, pak digitální 1,8 V a na konec obě analogová napětí.



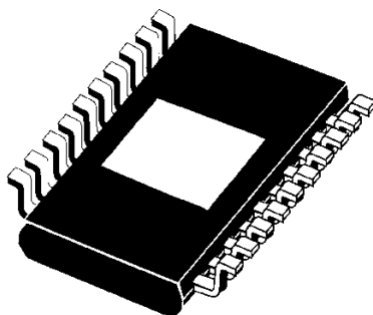
Obr. 3.19 Stabilizátor pro analogovou část obvodů

Pokud vypadne některé napětí, nebo na něm dojde ke zkratu, odpojí se všechna další napětí v řetězci pod ním. Kondenzátory C12 až C28 slouží k blokování rušení.

3.5 Návrh DPS

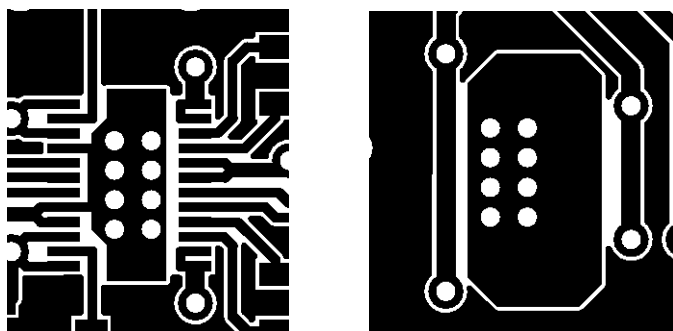
Návrh desky plošných spojů jsem provedl v pokročilém českém návrhovém systému LSD2000. Při návrhu desky bylo nutno řešit mnoho obtíží.

U vstupního modulu byl cíl maximálně zamezit pronikání rušení z okolí a skrze napájení. U pronikání rušení ze zdrojů do signálových vodičů, je velmi výhodná modulární stavba. Výkonové obvody a vstupní obvody se mohou umístit daleko od sebe a tak předejít průnikům rušení. U výkonového modulu byla zajímavá otázka chlazení samotného integrovaného zesilovače, taktéž u napájecích obvodů řídící desky. I když jde u zesilovače o třídu D, s daným výstupním výkonem je ztrátový výkon v řádech stovek mW. Texas Instruments, výrobce obvodu, používá u tohoto typu vlastní patentovaný systém odvodu tepla zvaný „PowerPad,“ na spodní straně pouzdra integrovaného obvodu je kovová ploška určená pro odvod odpadního tepla rozptýlením po desce plošných spojů pomocí integrovaných rozptylovačů tepla viz. obr. 3.20.



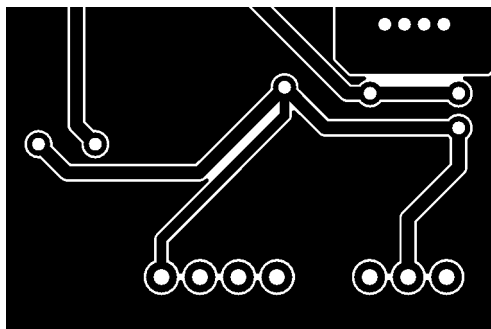
Obr. 3.20 PowerPAD

Proto je pod zesilovačem množství prokůvů odvádějící teplo na druhou stranu plošného spoje, kde je následně větší plochou rozlévané mědi rozptýleno do okolí viz. obr. 3.21.



Obr. 3.21 Rozvod tepla mědi po desce pl. spojů, měřítko 3:1

Z dalších vážných návrhových pravidel byla věnována pozornost na dělení napájení a zemí atd. viz obr. 3.22.



Obr. 3.22 Detail společného zemního uzlu.

Velikost samotných desek nebylo třeba nijak specifikovat, jelikož se jedná o vývojové řešení s cílem ověřit funkčnost metody a její vlastnosti. Malé rozměry desky však umožní minimalizovat délku jednotlivých spojů a tím omezit velikost pronikajících rušení. Z tohoto důvodu byly desky pečlivě naroutovány ručně jako dvouvrstvé, ale se součástkami osazenými na jedné straně, což velmi usnadňuje nejen osaditelnost, ale i další případné úpravy. Aby bylo měření všech obvodových veličin co nejjednodušší, jsou všechny desky opatřeny na klíčových místech měřicími body, jež umožňují sledovat všechny důležité průběhy napětí a proudů bez nutnosti připojovat měřicí sondy přímo na vývody součástek. To je u použitého stupně integrace velmi obtížné, neboť rozteče vývodů činí jen $0,5\text{--}0,65\text{ mm}$ a hrozí tedy omylem propojení sousedních vývodů, což nevyhnutelně povede k poškození obvodů. I ostatní součástky jsou obdobného stupně integrace, pouzdra SO, MSOP, TSSOT a podobné, rezistory a kondenzátory jsou většinou v provedení o velikosti 603 ($0,8 \times 1,6\text{ mm}$), které jsou nejspíše nejmenší ještě ručně osaditelná velikost. Pokud jsou použity součástky s drátovými vývody, bylo obtížné sehnat jejich SMD provedení.

Deska pro řídicí obvody nebyla po dohodě s vedoucím práce dočasně realizována, měřicí software bude navrhnout na vývojovém kitu „TMS320F2808 Experimenter Kit.“ Po odladění základního měřicího software, bude dle potřeb upraven návrh řídicí elektroniky a zhotoven návrh plošného spoje.

Dokumentace k výrobě DPS je pouze v elektronické podobě, z tištěných dat nelze desky s požitým stupněm integrace vyrobit v dostatečné kvalitě. Osazovací plán a motivy desek naleznete v příloze B.

4 Návrh SW řešení

Softwarová koncepce je dána nejen použitým hardwarem, ale i požadavky zadávající firmy EESA. V tomto případě není důležité mít univerzální systém s identifikací připojeného čidla, zde máme za úkol navrhnout software pro zpracování signálu tak, abychom dostali co nejpřesnější hodnotu rychlosti proudící kapaliny a signál o zaplněnosti potrubí.

Měřicí smyčka je poměrně jednoduchá, vykonává pouze prvotní nastavení přístroje po zapnutí a pak cyklicky opakuje sérii měření rychlosti proudění a detekci přítomnosti média.

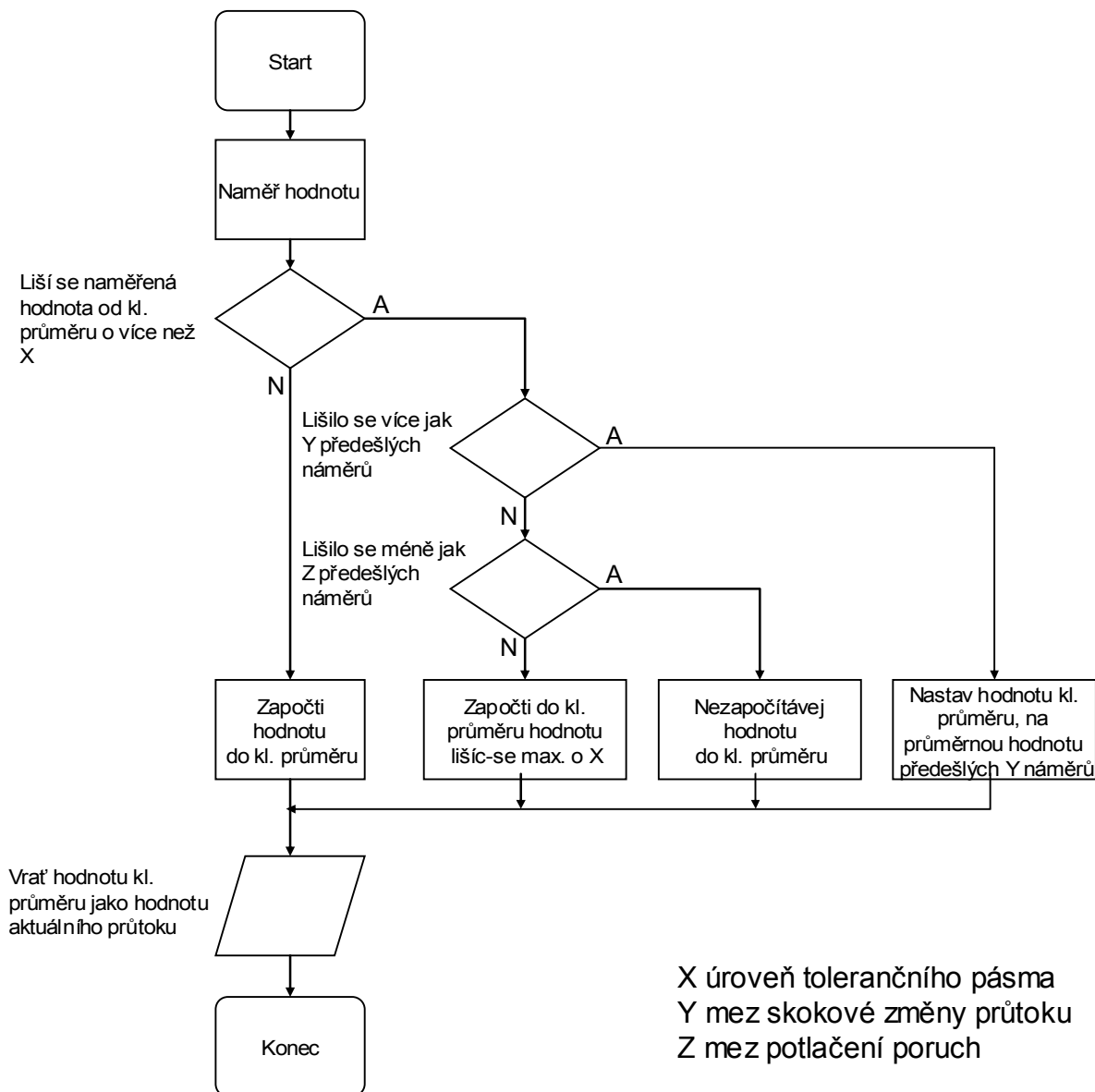
Nejvyšší programová smyčka vykonává ostatní činnosti, softwarovou kalibraci (pomocí nelineární funkcí se docílí lepší přesnosti), průběžnou recalibraci (především z důvodu dosažení stálosti nuly), generování průběhu budících pulzů. Obsluhuje paměti, které obsahují kalibrační konstanty a archivní data. Dále pak obsluhuje periferie, proudovou smyčku 4-20 mA, vykonává obsluhu displeje, sériových linek RS232, RS485, případně dalších komunikačních rozhraní MBUS, CANBUS, USB.

Princip digitální synchronní detekce byl již popsán v kapitole 2.

Dále se budeme věnovat zbývajícím dvěma oblastem, a to dodatečnému zpracování již naměřené rychlosti proudění a vyhodnocení signálu z detektoru média.

4.1 Zpracování užitečného signálu, Postprocessing

Naměřené údaje se dodatečně zpracovávají speciálními algoritmy, svým charakterem odpovídají silně nelineárním funkcím. Podle jejich složitosti musíme volit i odpovídající výpočetní systém. Algoritmus, který nejsme schopni dostatečně rychle spočítat je nepoužitelný, a nemá tedy žádný praktický význam.



Obr. 4.1 Funkční diagram postprocessingu

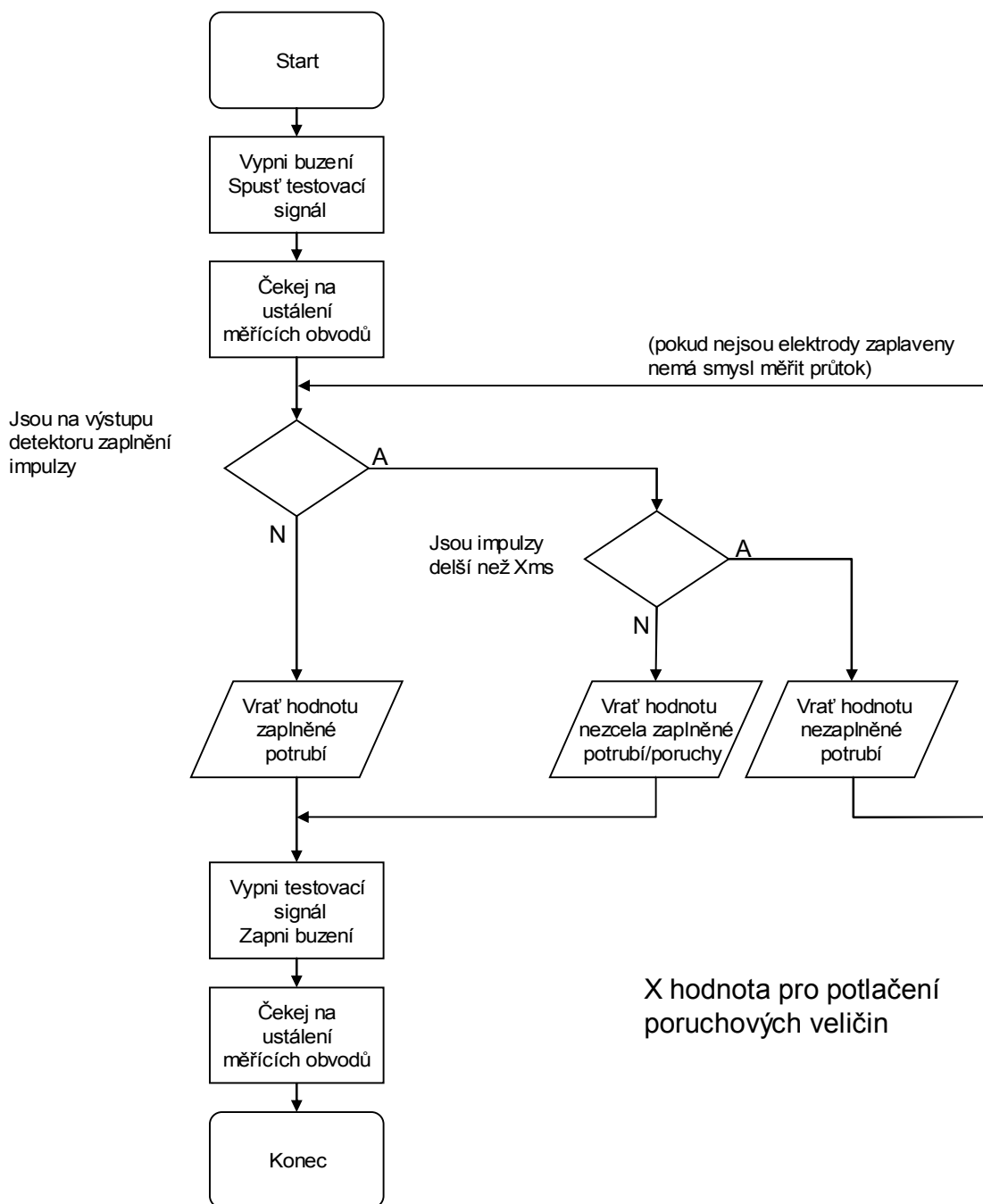
Naměřená hodnota aktuálního průtoku se nejprve porovná s velikostí klouzavého průměru. Pokud se hodnota liší o méně než X (X je absolutní hodnota změny mezi náměry), hodnotu započítáme do klouzavého průměru a hodnotu vrátíme nadřazené funkci. Pokud se hodnota liší o více než X , může nastat některá z následujících tří možností. Z předchozích náměrů se lišilo více než Y (Y počet vzorků udávající mez skokové změny průtoku), v tomto případě se aktuální průtok vypočte z průměru Y předešlých vzorků a vrátí se nadřazené funkci. Neliší-li se více než Y předešlých náměrů od klouzavého průměru a zároveň se neliší méně než Z (Z počet vzorků pro

potlačení poruch) vzorků, jedná se o nejspíše o poruchu, hodnota se nezapočítá do klouzavého průměru a vrátí se nezměněná předešlá hodnota. Třetí možností je, že se liší méně než Y vzorků a zároveň více než Z vzorků. V takovémto případě se nejspíše skokově změnil průtok, ale ještě nedosáhl meze pro skokovou změnu Y . Do klouzavého průměru se započte aktuální hodnota s maximální změnou rovnou o X , tato hodnota se vrátí nadřazené funkci. Průtok tedy po tuto dobu může růst nebo klesat.

Nastavení i takovéhoho jednoduchého algoritmu je poměrně obtížné, jelikož nelze stanovit jednoznačně výpočtem. Proto je vhodné použít simulační programy na reálných naměřených vzorcích, kde je možné jednoduše ověřit různá nastavení.

4.2 Řízení detekce média

V ideálním případě lze odečíst míru zaplnění potrubí pomocí simulovaného signálu o rychlosti proudící kapaliny. Tento předpoklad má své jisté omezení, směs musí být dostatečně homogenní, aby byla zaručena alespoň minimální přesnost, případné bubliny nesmí být větší než plocha elektrod, potrubí musí být zaplněno alespoň do poloviny. Pokud není některá z těchto podmínek splněna, měřená vodivost kanálu není věrohodná, a je nutno použít přímo výstup detektoru média. Výstup detektoru média není přímo logický stav zaplněnosti potrubí, i on je zatížen rušeními a poruchovými vlivy. Proto je třeba tento signál také podrobit následnému zpracování, které zpřesní hodnotu výsledku.



Obr. 4.2 Funkční diagram vyhodnocení zaplnění

Pro provedení měření je nejprve třeba vypnout budicí magnetické pole a zapnout testovací signál. Následně je třeba počkat na ustálení vstupních obvodů. Nyní můžeme sledovat stav na výstupu detektoru. Pokud na něm nejsou žádné impulzy, můžeme zkusit odměřit odpor kanálu a vyhodnotit výsledek. Pokud na detektoru jsou impulzy delší než stanovená hranice, nebo nulová logická úroveň, potrubí není dostatečně

zaplněno pro provedení měření průtoku. Vráť se hodnota nezaplněné potrubí a měření se opakuje, dokud není potrubí opět zaplněno. Pokud se však vyskytují na detektoru pulzy kratší než stanovená hranice, může stav být nezcela zaplněné potrubí, nebo menší bubliny v médiu, případně výskyt většího rušení. Zde je vhodné provést opakované měření, případně se pokusit o identifikaci měřením odporu kanálu.

5 Měření na převodníku

Metrologie, nauka o měření, nás učí vždy si ověřit správnost naměřených údajů. V našem případě také ověřit správnost teoretických předpokladů. Potřebná měření pro návrh převodníku, a reálná naměřená data na převodníku, jsou shrnuta společně se závěry v následujících odstavcích.

5.1 Měřicí soustava

Měření byla prováděna na kalibrační lince firmy EESA, viz příloha C. Dodatečná měření pak byla prováděna již v laboratorních podmínkách, jednalo se o měření s nulovým průtokem, tedy měření vodivosti kanálu a ověření funkce detektoru zaplnění. Pro ostatní měření a oživení elektronických modulů, již nebylo zapotřebí zvláštního vybavení a měření mohla být provedena v univerzitních laboratořích.

5.2 Detekce zaplnění potrubí

Jako první byl v souvislosti s detekcí média změřen odpor mezi elektrodami indukčního čidla, v závislosti na vodivosti kapaliny v potrubí. Naměřený odpor je porovnávám s vypočtenými hodnotami, R_1 odpovídá rov. 1.29 a R_2 odpovídá rov. 1.30.

Tab. 5.1 Odpor měřeného kanálu pro různou vodivost vody

Vodivost kapaliny σ [$\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$]	Naměřený odpor R [$\text{k}\Omega$]	Vypočtený odpor R_1 [$\text{k}\Omega$]	Vypočtený odpor R_2 [$\text{k}\Omega$]
200	13,4	12,5	11,8
150	16,7	16,7	15,7
86	27,0	29,1	27,4
30	66,8	83,3	78,4
15	120,0	166,7	156,9
7	155,0	357,1	336,1

Jak je z předchozí tabulky 5.1 patrné, vzorce 1.29 a 1.30 přibližně platí v rozsahu vodivostí přibližně nad $50 \mu S \cdot cm^{-1}$. Pokud je vodivost nižší, výpočtové vztahy již přestávají platit.

Dalším důležitým parametrem, je velikost asynchronního rušení pronikajícího do měřicích obvodů. Měření na kalibrační lince ukázalo, že rychlost proudění nemá vliv na jeho velikost. Naopak se ukázalo, že je velmi závislé na vodivosti média v potrubí. Mění se přibližně v rozsahu od 0,5 mV do 2 mV, pro kapaliny s vodivostí od $5 \mu S \cdot cm^{-1}$ do $250 \mu S \cdot cm^{-1}$. A to čím je kapalina více vodivá, tím je rušení menší. Velmi však záleží na intenzitě místních zdrojů rušení. S tímto ohledem byl také navržen detektor zaplnění.

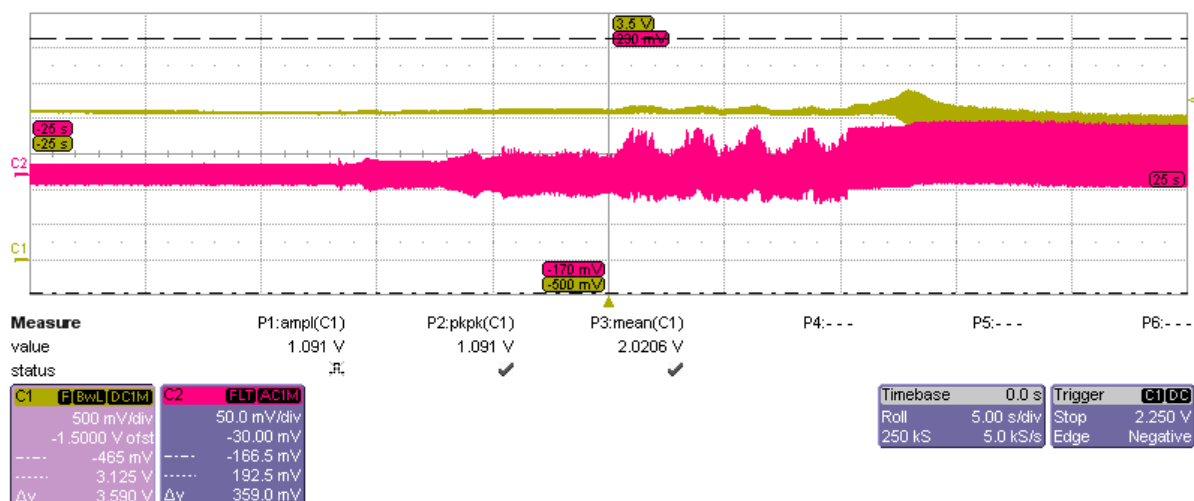
Jako další byl ověřen vliv rychlosti proudící kapaliny na velikost odporu kanálu. Měření proběhlo opět na kalibrační lince firmy EESA.

Tab. 5.2 Vliv rychlosti proudící kapaliny na odpor kanálu

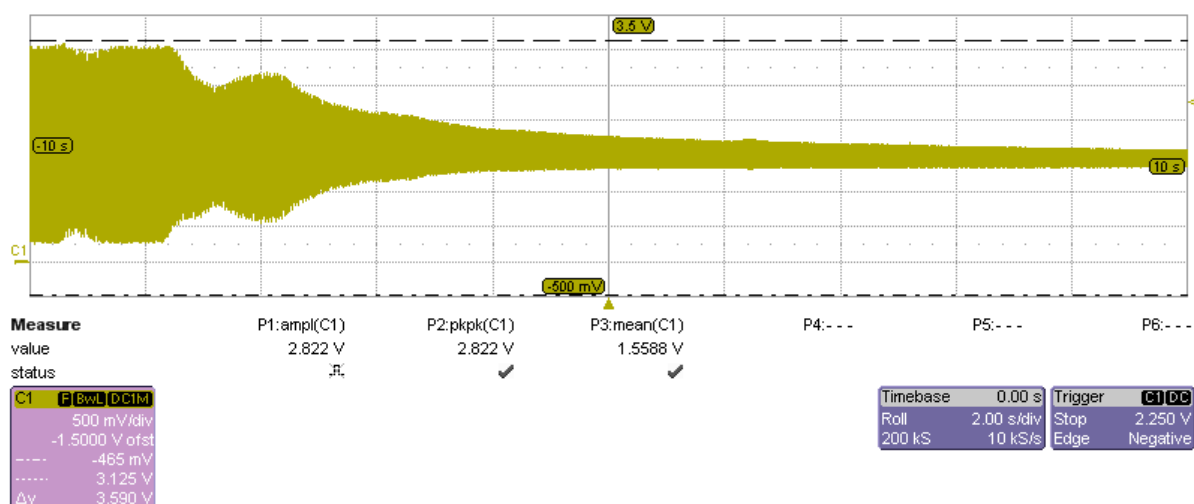
Rychlost průtoku Q_v [l/min]	Odpor kanálu R [k Ω]
0,0	11,0
0,5	10,8
1,0	10,9
2,0	10,9
3,0	11,0
5,0	11,1
7,0	11,0
9,0	11,2

Z předchozí tabulky 5.2 je patrné, že rychlost proudící kapaliny nemá podstatnější vliv na odpor kanálu, tudíž námi navrhovaná metoda detekce přítomnosti média v potrubí nemusí s tímto parametrem počítat.

Zajímavým poznatkem je, pokud je obvod detektoru dostatečně přizpůsoben konkrétnímu čidlu a vodivosti použité kapaliny, je měření odporu kanálu pomocí testovacího signálu velmi vhodné. Sledováním tvaru obálky lze ze signálu určit, jaká fáze kapaliny právě prochází čidlem viz. obr. 5.1 a 5.2.

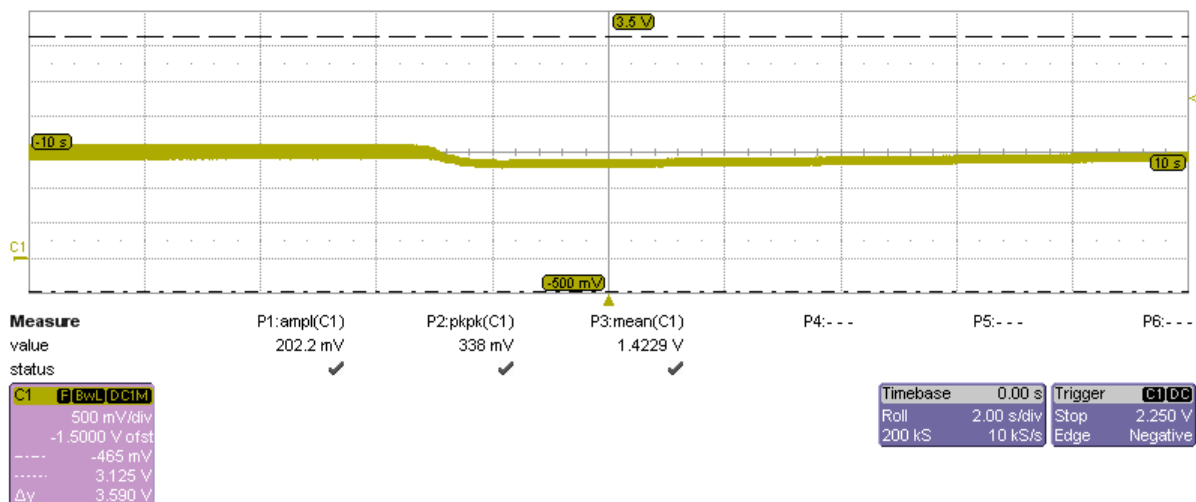


Obr. 5.1 Průběh při měření odporu kanálu, vyprazdňování potrubí



Obr. 5.2 Průběh při měření odporu kanálu, zaplňování potrubí

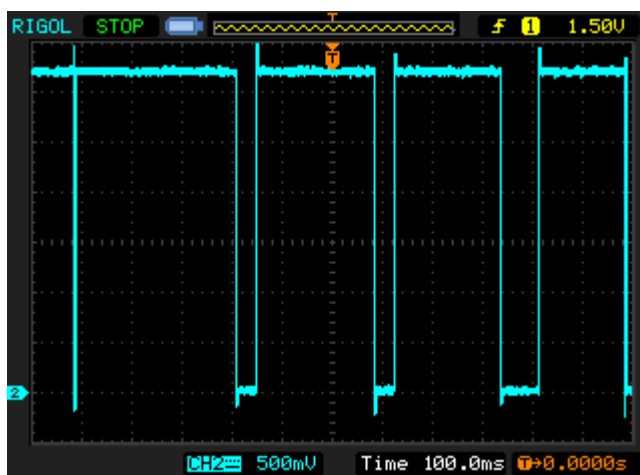
Dokonce lze pozorovat i změny vyvolané změnami tlaku v potrubí viz Obr 5.2. Tyto změny připisují především velkému okysličení použité vody, zvýšením tlaku dojde ke stlačení miniaturních bublinek a následnému nárůstu vodivosti kapaliny viz obr 5.3.



Obr. 5.3 Průběh při měření odporu kanálu, prudký nárůst tlaku

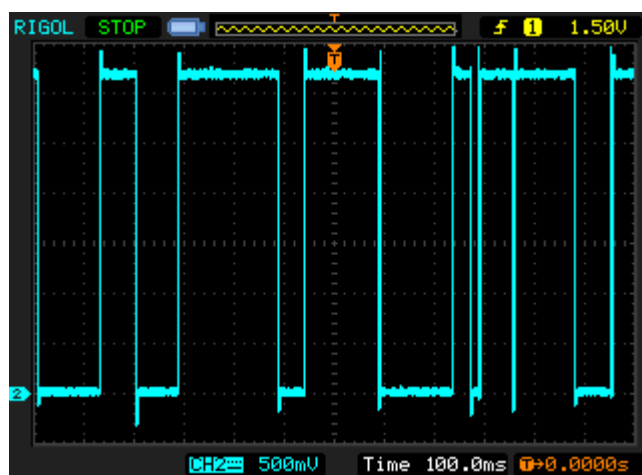
Měření na detektoru zaplnění:

Doplňkovou funkcí je schopnost rychlé detekce média v potrubí. Měření odporu kanálu měřením pomocí A/D převodníku nedokáže postihnout velmi rychlé poruchy, kvůli relativně nízké vzorkovací frekvenci. Z tohoto důvodu je obvod doplněn rychlým komparátorem. Pokud je potrubí zcela zaplněné, výstup komparátoru je v logické úrovni H. Jsou-li v médiu bubliny, dochází ke krátkodobým zvýšením odporu kanálu. Těm odpovídají krátké pulzy na výstupu komparátoru viz obr. 5.4.



Obr. 5.4 Výstup detektoru zaplnění – malé bubliny

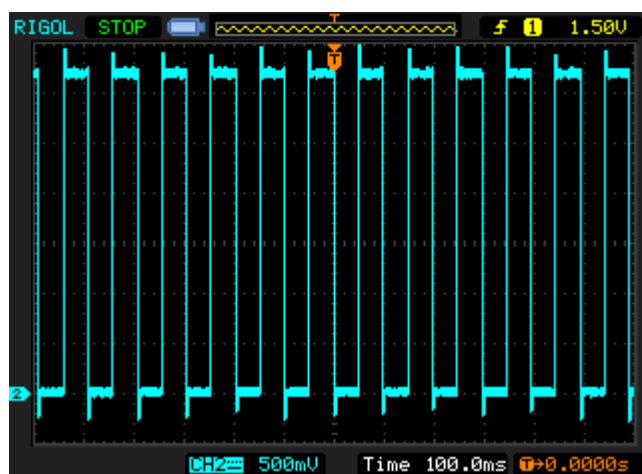
Pokud jsou v měřené kapalině bubliny nebo kapsy větší, odpovídá tomu i signál komparátoru viz. obr. 5.5. Délka pulzů se úměrně velikosti bublin zvětšuje.



Obr. 5.5 Výstup detektoru zaplnění – velké bubliny

Podle četnosti pulzů lze pak usuzovat četnost bublin v médiu.

Pokud je potrubí zcela vyprázdněné, přesněji je-li jedna z elektrod pod úrovní kapaliny, je výstupní signál obdélníkový o frekvenci testovacího signálu. viz. obr 5.6.



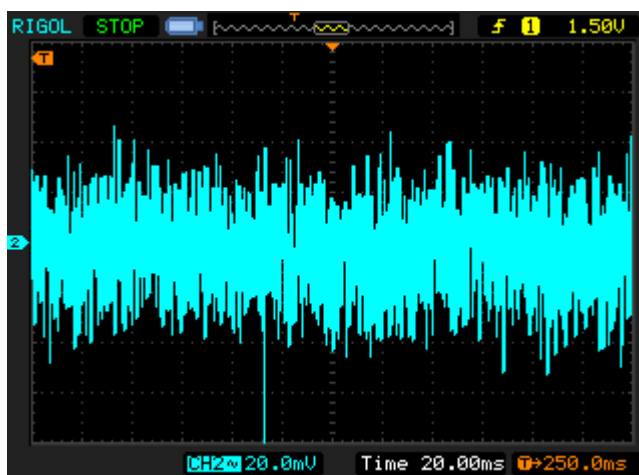
Obr. 5.6 Výstup detektoru zaplnění – vyprázdněné potrubí

5.3 Přesnost měření rychlosti průtoku

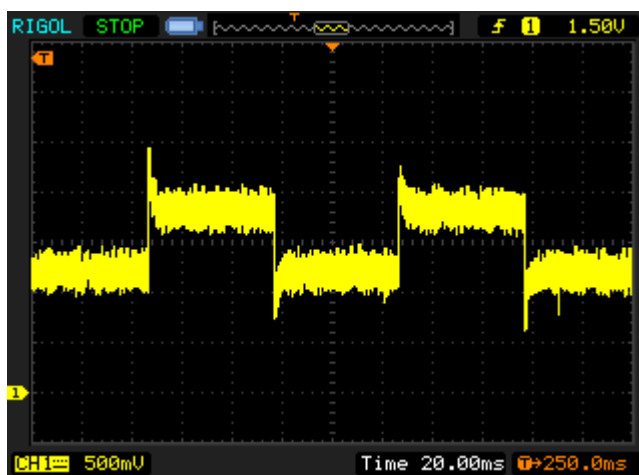
Bohužel konkrétní přesnost celého průtokoměru jako celku nelze nyní ověřit. Zatím není k dispozici plnohodnotný software využívající všechny výhody zvolených řešení.

Porovnáním a měřením na vstupních částech mnou navrhovaného převodníku a měřicí elektroniky průtokoměru MT600 poskytnutého firmou EESA, se ukázalo, že

výstup vstupního zesilovače vykazuje stabilní hodnotu. Není však možné prověřit přesnost měření v požadovaném 16-ti bitovém rozlišení, neboť softwarové zpracování signálu v současné době není k dispozici. Přesnost bude nejvíce záležet na kvalitě zpracovávajícího software, konkrétně tedy na kvalitě číslicové synchronní detekce.



Obr. 5.7 signál na elektrodách průtokoměrného čidla



Obr. 5.8 Signál na výstupu vstupního zesilovače

Navržené zapojení se zesilovačem INA331 teoreticky vykazuje vyšší stálost zesílení, vyšší CMMR a nižší zbytkové proudy, což umožní maximální využití napěťového rozsahu, který je k dispozici. Měření probíhalo při mezních podmínkách, vodivost použité vody $5 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.

5.4 Zhodnocení dosažených výsledků

Měřením na převodníku se ukázala správnost většiny uvažovaných předpokladů. Reálné výsledky ukazují na potenciál a prostor v pokračování práce, především v oblasti návrhu měřicího a obslužného softwaru. Významná část práce, detektor zaplnění, i přes svá omezení, se ukazuje jako funkční, především ve smyslu zabránění měření nesmyslných údajů, v případě, kdy není alespoň jedna elektroda v kontaktu s kapalinou.

Závěr

Základním úkolem diplomové práce bylo vytvořit hardware převodníku průtoku. Tento cíl byl splněn. Úvahy a závěry, vyvozené v teoretické části této diplomové práce, se ukázaly jako správné. Drobné odchylky, zjištěné při praktických zkouškách, lze velmi snadno vysvětlit nedokonalostmi fyzikálních modelů, nepřesnými údaji, různými tolerancemi a jinými jevy, kterým nelze zabránit. Žádná z nich však neměla zásadní vliv na samotnou funkci převodníku a po praktických měřeních jsou odstraněny.

Mnou navržený převodník dosahuje v analogové části obdobných parametrů jako elektromagnetické průtokoměry vyšší třídy. Díky použití digitálního signálního procesoru se však nabízí prostor pro zvýšení citlivosti, přesnosti a dynamiky měření a s tím spojené snížení příkonu. Oproti zadání má nová elektronika novou důležitou vlastnost - detekci přítomnosti média v potrubí. Momentálně je to velmi žádaná funkce a mnoho výrobců komerčních řešení ji v nabídce nemá, a pokud ano, tak za značný příplatek. Navíc tato funkce v mém provedení nevyžaduje úpravu čidla průtokoměru a nevede tedy k významnějším finančním nákladům.

V části věnované softwaru jsem naznačil algoritmus měření a další možnosti zpřesnění převodníku. Například měření odporu kanálu by umožnilo měření průtoku i média o vodivosti nižší než je stávajících $5 \mu S/cm$ nebo buzení cívek dvěma kmitočty by umožnilo zvýšení rozsahu měřených průtoků.

Podařilo se sestavit blok elektroniky, který je zajímavý svými vlastnostmi a může tedy sloužit nejen jako základ průmyslového průtokoměru, ale i jako pomůcka při názorném výkladu digitálního zpracování signálu s možností prakticky vyzkoušet vlastní algoritmy na reálných nebo generovaných signálech.

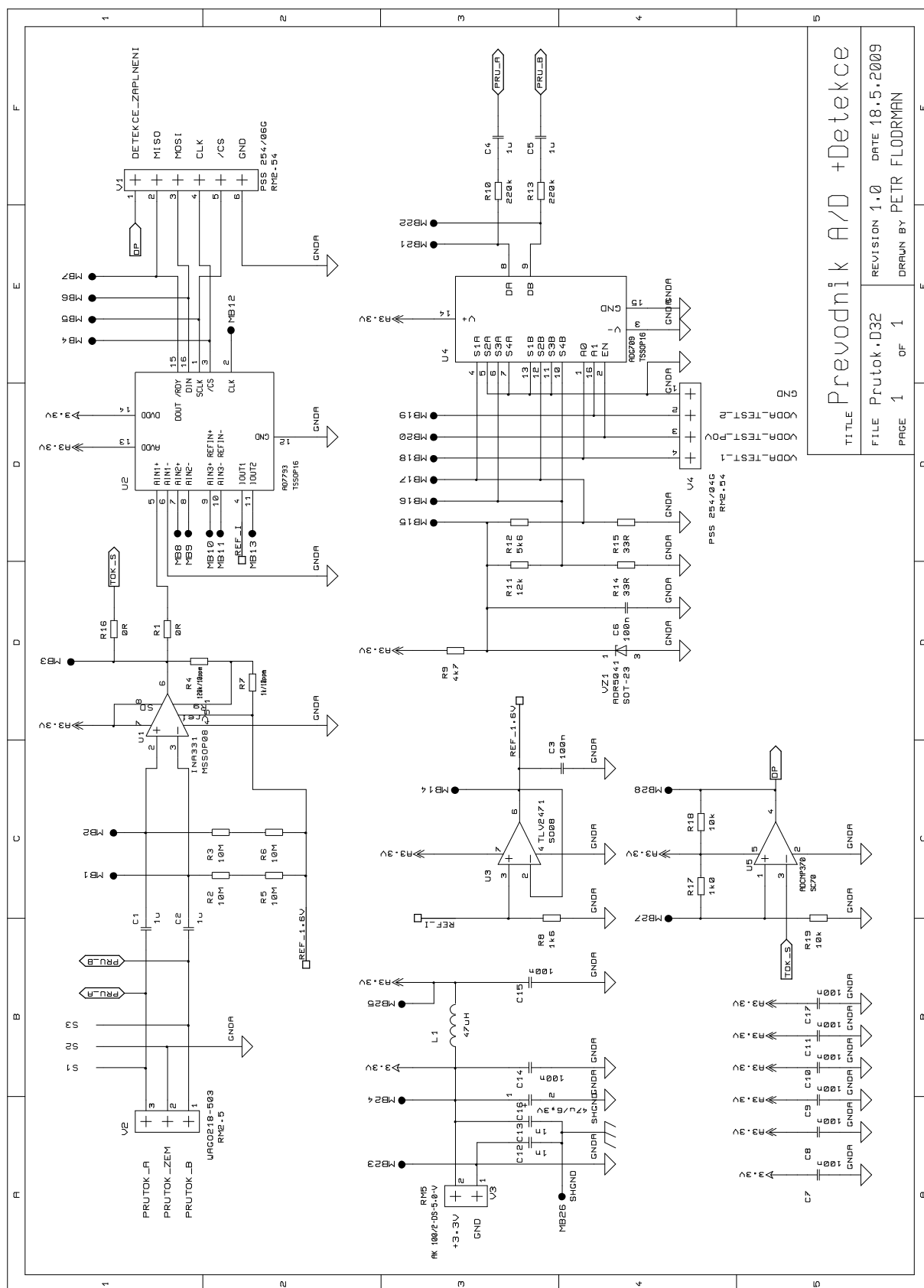
Literatura

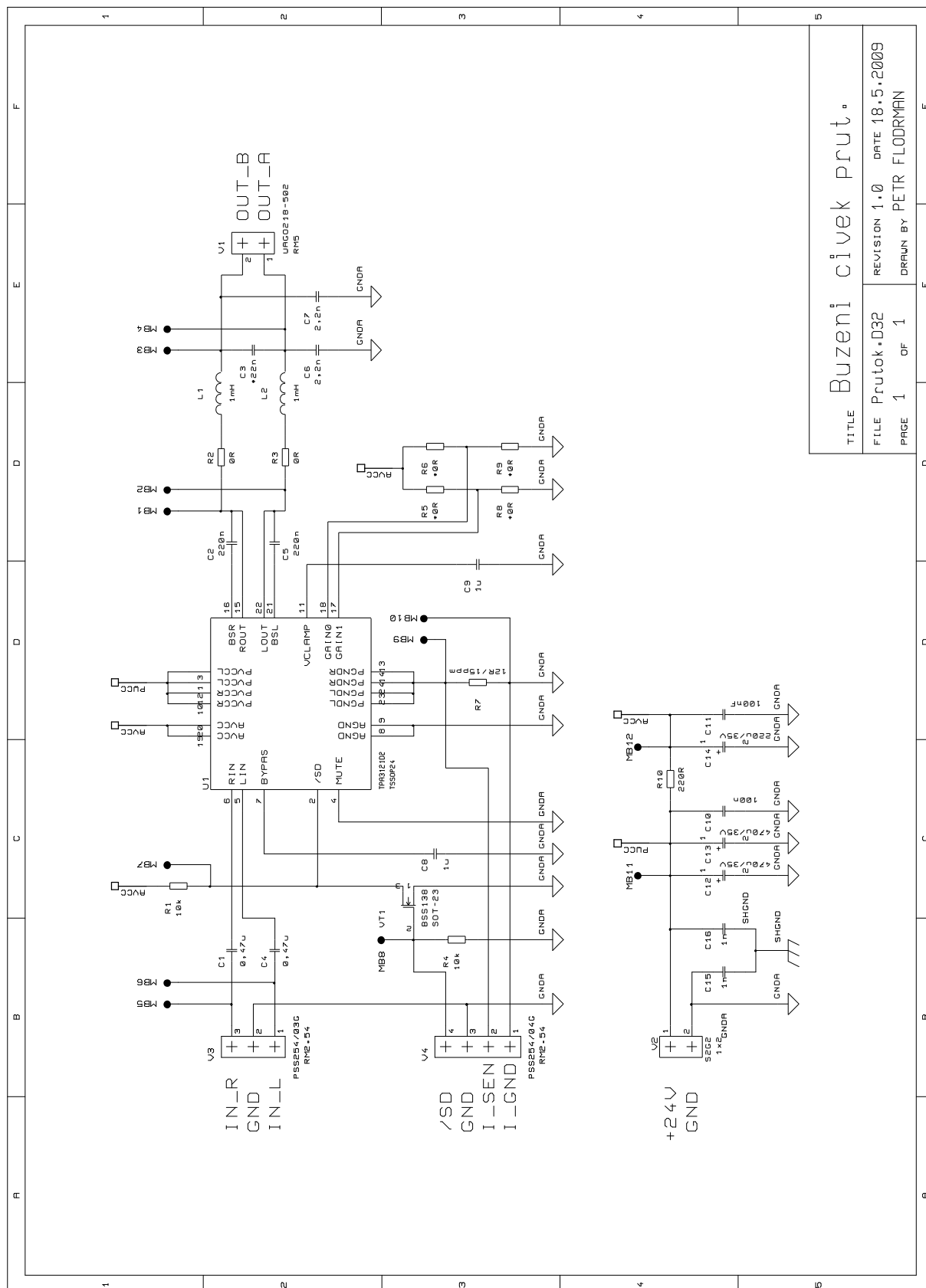
- [1-1] Wikipedia [online]. Heslo:Kapalina, [cit. 16.5.2009] Dostupné z WWW:
< <http://cs.wikipedia.org> >
- [1-2] ČSN EN 24006 – Měření průtoku v uzavřených profilech.
Terminologie (25 7701).
- [1-3] ĎAŘO S., BEJČEK L., PLATIL A.: *Měření průtoku a výšky hladiny*
BEN-technická literatura, Praha 2005, 1.vydání, ISBN80-7300-156-X.
- [1-4] BARKER R. C.: *Flow Measurement handbook*, Cambridge University Press,
UK, 2000.
- [1-5] Letecký ústav VUT v Brně [online], *Skripta aerodynamiky*, Dostupné z WWW:
< <http://lu.fme.vutbr.cz> >
- [1-6] FIALA P., SADEK V., DOHNAL P., BACHOREC T.: *Basic experiments with
model of inductive flowmeter*, VUT Brno 2007
- [1-7] RICHTER A.: *Vliv hydromechanických poruch na činnost indukčních
průtokoměrů*, Automa č. 2, 2002, str. 8-10.
- [1-8] DOEBELIN E. O.: *Measurements Systéme Applications and Design*,
Mc Graw-Hill, New York, 1990.
- [1-9] *Flow Handbook*. Endress + Hauser Flowtec AG, Reinbach, 2004,
ISBN 3-9520220-4-7
- [1-10] Materiály firmy EESA [online], [cit. 16.5.2009] Dostupné z WWW:
< <http://www.eesa.cz> >
- [2-1] PLATIL A.: *Úvod do synchronní detekce*, ČVUT 2002, Dostuné z WWW:
< <http://measure.feld.cvut.cz> >
- [2-2] *Technika dávkování vstupuje do 21. století*, Automa, č. 2, 2002, str. 44-45.
- [2-3] SMÉKAL Z., SYSEL P.: *Signálové procesory*, Nakladatelství Sdělovací
technika, Praha 2006, 1. vydání, ISBN 80-86645-08-8.
- [3-1] Materiály firmy Krohne [online], [cit. 16.5.2009] Dostupné z WWW:
< <http://www.krohne.com> >

Seznam příloh

A	Schémata	
	Převodník A/D + detekce zaplnění	74
	Buzení el. mag.cívek.....	75
	Řízení a zpracování signálu	
	Řídící část.....	76
	Svorkovnice a konektory	77
	Napájení	78
B	Plány desek pl. spojů	
	Vszupní zesilovač.....	79
	Budicí zesilovač	80
C	Měřicí soustavy.....	81

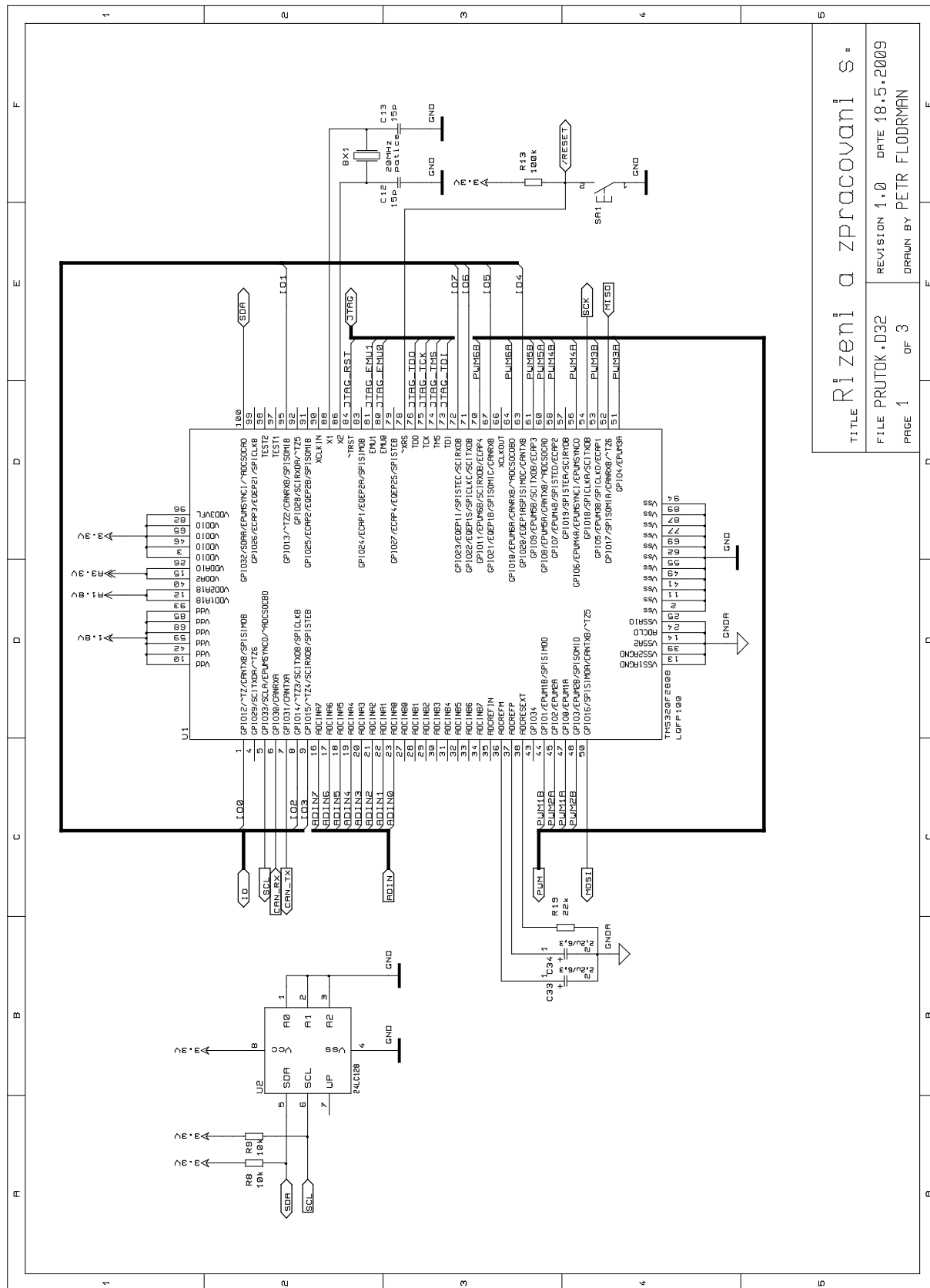
Příloha A: Schémata





TITLE Buzeni civek prut.

FILE Prutok.D32 DATE 18.5.2009
PAGE 1 OF 1
DRAWN BY PETR FLODRMAN

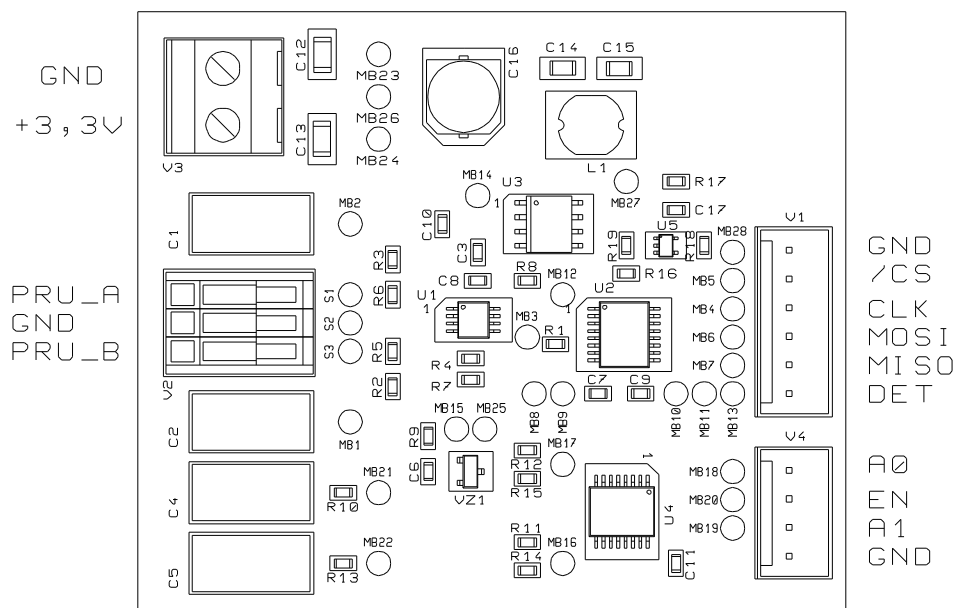


TITLE Rizeni a zpracovani s

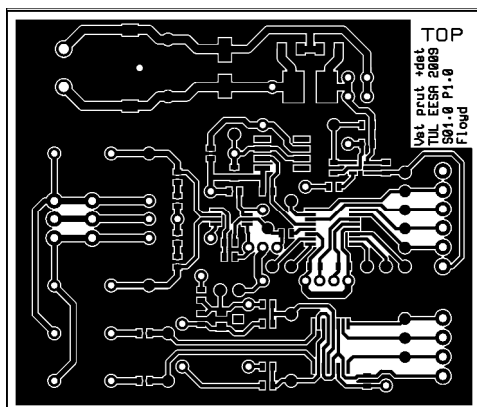
FILE PRUTOK.D32 DATE 18.5.2009

PAGE 1 OF 3 DRAWN BY PETR FLODRMAN

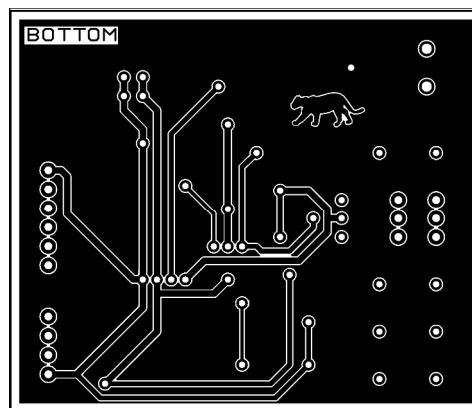
Příloha B: Plány desek pl. spojů



Deska vstupního zesilovače, A/D převodníku a detekce média. (3:2)

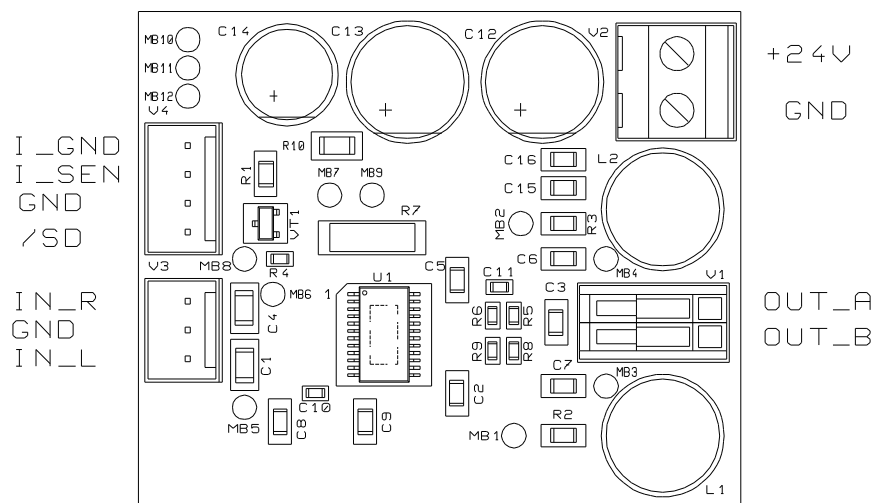


horní

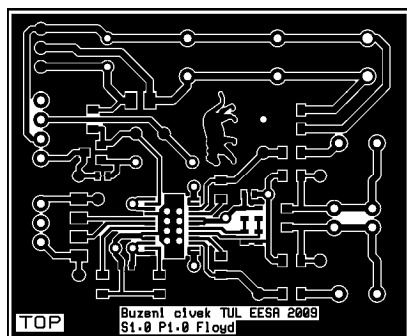


dolní

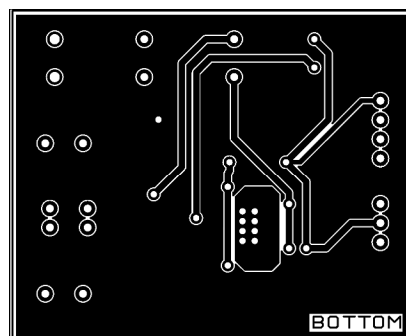
Motiv plošných spojů vstupního zesilovače



Deska zesilovače budicího signálu. (3:2)



horní



dolní

Motiv plošných spojů zesilovače budicího signálu

Příloha C: Měřicí soustavy



Měřicí pracoviště, kalibrační linky firmy EESA



Kalibrované průtokoměry